

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS PAKKASBETONIN LUJUUDENKEHITYKSEEN

Tuukka Lahtinen

Opinnäytetyö
Joulukuu 2012

Rakennustekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) LAHTINEN, Tuukka	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 28.11.2012
	Sivumäärä 59	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi LÄMPÖTILAN VAIKUTUS PAKKASBETONIN LUJUUDENKEHITYKSEEN		
Koulutusohjelma Rakennustekniikan KO		
Työn ohjaaja(t) HAAPAMAA, Hannu		
Toimeksiantaja(t) Lujabetoni Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Lujabetoni Oy. Työn tarkoituksena oli selvittää pakkasbetonin lujuudenkehityksen nopeutta eri lämpötiloissa. Työlle oli tarvetta, koska Lujabetonilla ei ollut aiemmin tehty vastaavaa tutkimusta oman pakkasbetonin lujuudenkehityksestä eri lämpötiloissa, vaan arviot lujuudenkehityksen nopeudesta oli jouduttu perustamaan yleisiin kaavioihin ja käytännön kokemuksiin.</p> <p>Tutkimus suoritettiin Lujabetonin valmisbetoniasemalla Muuramessa, mutta teknisten ongelmien vuoksi osa tutkimuksesta siirrettiin Siilinjärven Lujabetonille. Tutkimuksessa valmistettiin pakkasbetonimassa, josta valettiin yhteensä 34 koekappaletta. Tuoreesta betonimassasta testattiin sen työstettävyyden kannalta tärkeät asiat ja merkattiin ylös Lujabetonin esitettä varten. Valamisen jälkeen koekappaleet siirrettiin suunnitelmien mukaisesti pakastimiin ja jääkaappeihin. Koekappaleet punnittiin ja niiden lujuudet testattiin aikataulun mukaisesti. Tulokset kirjattiin ylös ja niiden perusteella tehtiin kuvaajat pakkasbetonin lujuudenkehitysnopeudesta erilaisissa lämpötiloissa.</p> <p>Tuloksien voidaan katsoa olevan hyödyllisiä, koska pakkasbetonin lujuudenkehitykselle ei ole onnistuttu määrittämään lämpötiloja vastaavaa laskennallista lujuudenkehitystä ja mm. Betoniteollisuus Ry:n viralliset talvisaumaohjeet ohjeistavat pakkasbetonin käyttäjää vertaamaan valun lämpötiloja betonitoimittajalta saataviin ohjeellisiin lujuudenkehityskäyriin. Saaduista lujuudenkehityskäyristä voidaan betonin lämpötilaa seuraamalla päätellä, milloin betoni on saavuttanut kunkin kolmesta kylmissä olosuhteissa tapahtuvan betonoinnin kannalta merkittävistä lujuudenkehitysvaiheista, joita ovat muottien purkamis-, jäätymis- sekä nimellislujuuden saavuttaminen. Saadut tutkimustulokset muodostavat hyvän arviointipohjan Lujabetonin pakkasbetonimassan lujuudenkehityksen nopeuden arvioimiseen erilaisissa lämpötiloissa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Pakkasbetoni, talvibetonointi, Lujabetoni		
Muut tiedot		



Author(s) LAHTINEN, Tuukka	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 28.11.2012
	Pages 59	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title INFLUENCE OF THERMAL CONDITIONS TO GAINING STRENGTH OF ANTI-FREEZE CONCRETE		
Degree Programme Civil Engineering		
Tutor(s) HAAPAMAA, Hannu		
Assigned by Lujabetoni Oy		
<p>Abstract</p> <p>This thesis was assigned by Lujabetoni Oy. The aim of this research was to explore the speed of gaining strength of anti-frost concrete in different thermal conditions. There was a need for this kind of research since Lujabetoni had not conducted similar research on gaining strength of their own anti-frost concrete; however the estimates of the speed of gaining strength had been based on general graphs and their own practical experience.</p> <p>The research was carried out in the concrete plant of Lujabetoni in Muurame Finland, but because of the technical difficulties, a part of the research project had to be relocated to Lujabetoni's factory in Siilinjärvi Finland. In this research the anti-frost concrete mass was mixed and poured to 34 specimen cubes. Fresh concrete was tested and all the properties affecting workability were written down for Lujabetoni's product brochure. After the concrete mass was mixed the specimen cubes were transferred to fridges and freezers. Gaining strength of the specimen cubes was tested according to schedule and the results were converted to a diagram form.</p> <p>The results of the research project will be useful for Lujabetoni because there are no official diagrams for gaining strength of anti-frost concrete. The standards of Betoniteollisuus Ry also advise the user of anti-frost concrete to compare the manufacturer's own diagrams to evaluate the speed of gaining strength of the anti-frost concrete. The diagrams of the research project can be used when evaluating and comparing the time in which the concrete has reached the strength with some of the three meaningful points when concreting in cold weather, which is the strength to safely remove the casts, safely to freeze and the aimed strength of concrete. The results of the research will offer a very useful tool to estimate the speed of gaining the strength of Lujabetoni's anti-freeze concrete in different thermal conditions.</p>		
Keywords Anti-freeze concrete, concreting in winter, Lujabetoni		
Miscellaneous		

SISÄLTÖ

1. TYÖN LÄHTÖKOHDAT.....	4
2. BETONIN OMINAISUUDET	5
2.1 Yleistä betonista.....	5
2.2 Betonin koostumus.....	6
2.3 Betonin valmistus	9
2.4 Oikean betonimassan valinta	9
2.5 Kuljetus	13
2.6 Betonointi	14
2.7 Betonin lujuudenkehitys	16
2.8 Betonointi kylmissä olosuhteissa.....	17
3. TUOREEN BETONIMASSAN OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN	21
3.1 Notkeusluokat	21
3.2 Näytteenotto.....	22
3.3 Tuoreen massan ominaisuuksien mittaaminen	22
4. BETONIMASSAN LUJUUDENKEHITYKSEN TUTKIMINEN LABORATORIO-OLOSUHTEISSA	25
4.1 Koekappaleiden valmistus.....	25
4.2 Muotit	25
4.3 Valaminen	26
4.4 Lujuuden testaus.....	27
5. PAKKASBETONI.....	28
5.1 Resepti.....	28
5.2 Valmistus.....	30
6. PAKKASBETONIN KÄYTTÖ.....	31
6.1 Yleisimmät käyttökohteet	32

6.2 Käytön rajoitukset.....	32
7. TUOREEN MASSAN OMINAISUUDET	34
8. VAIKUTUKSET BETONOINTITYÖHÖN	35
8.1 Työstöaika.....	35
8.2 Notkeusluokat	35
8.3 Kuljetus	36
8.4 Jälkihoito	36
9. KOVETTUVAN JA KOVETTUNEEN BETONIN OMINAISUUDET	36
10. LÄMPÖTILAN VAIKUTUS LUJUUDENKEHITYKSEEN	37
10.1 Lujuudenkehityksen arviointi ja seuranta	37
10.2 Tutkimuksen aloitus	38
10.3 Tutkimuksen eteneminen	40
10.4 Lämpötilan vaikutusten arviointi	47
11. YHTEENVETO	48
LÄHTEET	50
LIITTEET	53
Liite 1: Lujuuskäyrät tutkimustuloksista	53
Liite 2: Testaustulokset Jyväskylä.....	54
Liite 3: Testaustulokset Siilinjärvi	55
Liite 4: Näytteenottopäiväkirja pakkasbetonista (Lujabetoni, 2012).....	56
Liite 5: Tuotelehti Antifrost 45 (HaBe, 2012)	57

KUVIOT

KUVIO 1. Betonin koostumuksien ja ominaisuuksien raja-arvoja eri käyttöikäluokissa	12
KUVIO 2. Betonin lujuusluokat eri koekappaleilla.....	17
KUVIO 3. Betonin lujuudenkehityksen tärkeimmät tarkastushetket.....	19
KUVIO 4: Lehtileike Lahti-lehdestä, vuodelta 1963	19
KUVIO 5. Termisten vuodenaikojen ajankohdat Turussa ja Sodankylässä vertailukaudella 1981 - 2010	20
KUVIO 6. Eri notkeuksisia betonimassoja	22
KUVIO 7. Vesi-sementtisuhteen vaikutus pakkasbetonin lujuuteen	29
KUVIO 8. Rautamuotti.....	39
KUVIO 9. Muotti painuman mittausta varten	40
KUVIO 10. Automaattitermostaatilla varustettu pakastin (-5 °C)	41
KUVIO 11. "Loggeri"	42
KUVIO 12. Muovimuotteja odottamassa purkamista	43
KUVIO 13. Vaaka koekappaleiden punnitsemista varten	44
KUVIO 14. Koekappaleita odottamassa puristamista.....	44
KUVIO 15. Koekappale valmiina puristamiskoetta varten	45
KUVIO 16. Puristettu koekappale.....	45
KUVIO 17. Lujuudentestauskoneen asteikko (kN)	46
KUVIO 18. Normaali betonin lujuudenkehitys.....	48
KUVIO 19. Pakkasbetonin ohjeellinen lujuudenkehitys	48

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Uusi notkeusluokitus	21
TAULUKKO 2. Pakkaslisäaineen annostus eri lämpötiloille	31
TAULUKKO 3. Pakkasbetonin työstöaika.....	35
TAULUKKO 4. Koetulokset tuoreen betonimassan ominaisuuksista.....	40
TAULUKKO 5. Loggereiden tallentamat lämpötilat Muuramessa testatuille koekappaleille.....	42
TAULUKKO 6. Muunnetut lujuudet.....	46

1. TYÖN LÄHTÖKOHDAT

Tässä opinnäytetyössä perehdytään pakkasbetoniin. Idea opinnäytetyön aiheesta tuli Lujabetoni Oy:n tarpeesta tutkia oman pakkasbetonimassansa lujitumisaikoja eri lämpötiloissa.

Pakkasbetonille ei ole olemassa virallisia kaavoja tai muita keinoja betonin lujuudenkehityksen arvioimiseen, ilman olosuhdekoekappaleiden tekoa tai betonivalusta porattavia näytekappaleita. Virallisesti ohjeistetaan käyttämään pakkasbetonin lujuudenkehityksen arvioimiseen valmistajilta saatavia ohjeellisia taulukoita.

Pakkasbetonin lujuudenkehityksestä eri lämpötiloissa on saatavana ainoastaan eri valmistajien julkaisemia taulukoita, mutta koska resepti on jokaisella valmistajalla hieman erilainen, on tärkeää että jokainen pakkasbetonivalmistaja tutkii oman betoninsa ominaisuudet itse.

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli tutkia Lujabetoni Oy:n pakkasbetonimassan lujuudenkehitysnopeuksia ja kerätä yhteen tietoa ja määräyksiä, koskien pakkasbetonia. Työn alkuosa käsittelee betonia ja betonointia yleensä ja toimii ”johdantona” aiheeseen.

Opinnäytetyön tilaajana oli Lujabetoni Oy. Lujabetoni kuuluu Luja-yhtiöihin. Luja on pitkät perinteet omaava perheyryitys, joka on toiminut rakennusallalla jo lähes 60 vuotta. Tällä hetkellä Luja on Suomen suurimpia rakennusalan konserneja. Luja-yhtiöihin kuuluvat rakennusliike Lujatalo Oy, betoniteollisuusyrittys Lujabetoni Oy ja kuivatuoteyrittys Fescon Oy. Luja työllistää yli 1600 henkeä ja sen liikevaihto on 454 miljoonaa euroa vuodessa. (Lähes 60 vuotta Lujaa yrittäjähengeä, 2012)

Lujabetoni on Suomen kolmanneksi suurin betoniteollisuusyrittys, joka tarjoaa palveluja kattaen koko betonirakentamisen sektorin. Suomessa Lujabetoni toimii 25 eri paikkakunnalla ja työllistää 655 henkeä. Lujabetonilla on myös tytäryhtiö Lujabetong Ab Tukholmassa ja OOO Lujabeton Venäjällä. (Lujabetoni yrityksenä, 2012)

2. BETONIN OMINAISUUDET

2.1 Yleistä betonista

Betoni, joka on maailman eniten käytetty rakennusmateriaali, on keinotekoisesti valmistettua kivimäistä rakennetta, jonka massa on noin 2400 kg / m^3 .

Betonilla on erittäin suuri puristuslujuus (yleensä 30 - 80 MPa), mutta esimerkiksi teräkseen verrattuna keho vetolujuus (noin 6-10 prosenttia puristuslujuudesta). Jotta betonirakenne saataisiin kestäväksi myös vetoa, joudutaan siihen yleensä lisäämään vetoa kestäviä raudoitukset, jolloin saatavasta rakenteesta käytetään nimeä teräsbetonirakenne.

Betonimassa koostuu kiviaineksesta, sementistä, vedestä ja mahdollisesti seos- ja lisäaineista. Betonin sitoutuminen ja lopulta kovettuminen tapahtuu, kun sementin sisältämät mineraalit reagoivat veden kanssa, mikä johtaa fyysikaalisiin ja kemiallisiin muutoksiin betonimassassa. Tämän hydrataatioksi kutsutun reaktion ansiosta veden ja sementin muodostama pasta kovettuu kuivutessaan.

Betonista saadaan tehtyä kulloiseenkin käyttötarkoitukseen sopivaa käyttämällä suhteitusta. Suhteituksella tarkoitetaan betonin osa-aineiden määrien yhteensovittamista siten, että betonin halutut ominaisuudet saavutetaan. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 121.)

Betonin suosio rakennusten runkomateriaalina perustuu sen edulliseen hintaan, kosteuden kesto, lujuuteen, jäykkyyteen, turvallisuuteen sekä muokattavuuteen. Betonia käytetään paikoissa, missä tarvitaan suuria, stabiileja ja turvallisia rakenteita, jotka ovat usein yhteydessä veteen tai maahan. (Betonin ominaisuudet ja käyttö, 2012)

Betonia käytetään rakennustyömailla elementteinä ja paikallavalaen. Betoniset rakennuselementit ovat elementtitehtaalla valettuja valmiita rakennusosia, jotka kuljetetaan työmaalle ja asennetaan paikalleen. Käytettäessä paikallavaltetekniikkaa tuore betonimassa tuodaan työmaalle, jossa se valetaan lopullisella paikallaan olevaan muottiin.

Betonirakenteiden suunnittelukäyttöäksi valitaan yleensä vähintään 50 vuotta, mutta rakenteet voidaan suunnitella jopa 200 vuoden käyttöäälle. Sisätiloissa betonirakenteet ovat periaatteessa ikuisia, sillä ei ole mitään vauriomekanismia, joka turmelisi betonia normaaleissa sisätiloissa. Betonin käyttöikään vaikuttavia asioita ovat lujuusluokka, vesi-sideainesuhde, sementin määrä ja laatu, betonin lisäaineistus, raudoituksen betonipeitteen paksuus, raudoitteen laatu sekä ulkoiset rasitukset. (Betonin käyttöikä, 2012)

2.2 Betonin koostumus

Betonin osa-aineita ovat sementti, kiviaines, seosaineet, vesi, lisäaineet ja muut aineet. (Betoninormit by 50. 2004, 97.)

Sementti

Sementti on betonin sideaine. Sementin määrä betonissa on noin 200-400 kg/m³ (8-16 paino-%). Sementti muodostaa veden kanssa kovan huokoisen mineraalin (sementtikivi tai pasta), joka kiinnittää runkoainerakeet sekä mahdollisen raudoituksen ja pigmentit betoniin. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Sementin raaka-aineita ovat kalkkikivi, kvartsi ja savi, joita on maapallolla runsaasti. Raaka-aineet jauhetaan ja poltetaan uunissa 1450 ° C lämpötilassa. Lähtöaineiden alkuperäinen rakenne hajoaa veden ja hiilidioksidin poistuessa. Reaktiossa syntyy pääasiassa kaliumsilikaateista muodostuneita klinkkerimineraaleja, joista sementti jauhetaan. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Yleisimmät Suomessa käytettävät rakennussementit ovat yleissementti, rapidsementti, SR-sementti sekä valkosementti. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 44 - 45.)

Kiviaines

Betonin kiviaineeksena voidaan periaatteessa käyttää mitä tahansa materiaalia, joka on riittävän lujaa, tiivistä ja rakeista. Kiviaineksen tulee myös olla ominaisuuksiltaan sellaista, joka mahdollistaa sementtiliiman tartunnan. Se ei myöskään saa osallistua sementin reaktioihin, eikä huonontaa betonin säilyvyyttä.

Kivi- eli runkoainesta on betonissa suurin osa (noin 70-80 paino-%) ja se koostuu erikokoista kivirakeista (0.02 - 16 mm). Runkoaineen karkeimman osan muodostaa murske tai luonnonsora ja hienomman luonnonhiekkä. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Murskatun kiviaineksen käyttö lisääntyy koko ajan, sillä hyvälaatuisten murskaamattoman luonnonkiviaineksen saanti, varsinkin Etelä-Suomessa alkaa olla vaikeaa. Kiviaineksena voidaan käyttää myös ns. keinotekoisia kiviaineksiä kuten kevytsoraa, masuunikuonaa eri muodoissa, lentotuhkaa, tiilimurskaa tai betonimurskaa. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 32.)

Seosaineet

Betonissa käytetään usein lisä- ja seosaineita esimerkiksi tuoreen betonin työstettävyyden lisäämiseksi tai kovettuneen betonin tiiviiden, lujuuden ja säilyvyysominaisuuksien parantamiseksi. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 31.)

Yleisimpiä betonissa käytettyjä seosaineita ovat:

- Lentotuhka
 - o Lentotuhkaa syntyy kivihiilen poltosta voimalaitoksissa. Se erotetaan palokaasuista sähkösuotimin. Lentotuhkan käytöstä saadaan hyötyä sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksien hallintaan. Lentotuhka voi toimia betonissa hienoaineksena tai sillä voidaan korvata sementtiä.
- Masuunikuona
 - o Masuunikuonaa syntyy raudan valmistuksen yhteydessä satoja tuhansia tonneja vuodessa. Sillä voidaan osittain korvata portlandsementtiä.

- Silika

- o Silika on piiraudan ja piin valmistuksessa syntyvä erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silika lisää betonin lujuutta. Lisäksi se parantaa betonin kemiallista kestävyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä.

(Seosaineiden käyttö, 2012)

Vesi

Betonimassaan käytettäväksi vedeksi soveltuu tavallinen juomavesi. Sementtirakeiden ja veden reagoiminen saa aikaan betonin kovettumisen. Humuspi-toinen suovesi tai järvivesi ei sovellu betoniin, sillä se häiritsee betonin kovettumisreaktiota. Erityisesti on vältettävä vettä, joka sisältää pieniäkin pitoisuuksia sokeria, koska se hidastaa, tai jopa estää betonin kovettumisen. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Lisäaineet

Betonimassan ominaisuuksia voidaan säädellä myös lisäaineilla. Lisäaineiden vaikutustapa on fysikaalinen tai kemiallinen ja niiden määrät betonissa ovat hyvin pieniä verrattuna muihin betonin osa-aineisiin. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 63.)

Lisäaineiden käyttö vaatii aina esikokeita ja huolellisuutta, koska lisäaineella on usein päävaikutuksensa lisäksi sivuvaikutuksia. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 63.)

Tavallisimpia betonissa käytettyjä lisäaineita ovat erilaiset notkistimet, huokostimet, kiihdyttimet, hidastimet, tiivistysaineet, injektointiaineet sekä pakkaslisäaineet.

Muut aineet

Betonissa voidaan käyttää myös muita, lähes reagoimattomia 1-luokan seosaineita, jotka alkutestauksen perusteella täyttävät kyseiselle betonille asetetut vaatimukset. (Betoninormit by 50. 2004, 98.)

2.3 Betonin valmistus

Betoni valmistetaan sekoittamalla osa-aineet betonimyllyssä. Halutun tyyppinen betonimassa saadaan aikaan suhteituksen ja lisäaineiden avulla. Betonia voidaan valmistaa rautakaupoissa myytävillä pienillä betonimyllyillä, mutta nykyisin suurin osa rakennustyömailla käytettävästä betonista valmistetaan valmisbetoniasemilla, joilla on käytössään suuret betonimyllyt ja tarvittava kalusto betonin siirtoon työmaalle.

Nykyaikaisella valmisbetoniasemalla betonin valmistus on nopeaa ja siistiä työtä, jossa koneet hoitavat betonin osa-aineiden mittaamisen ja kuljetuksen automatiikan avulla toimivaan betonimyllyyn.

2.4 Oikean betonimassan valinta

Betonimassalla tulee olla sellaiset ominaisuudet, että se tarkoitukseen soveltuvia menetelmiä käyttäen tiivistettynä ja käsiteltynä, kovetuttuaan täyttää sille asetetut vaatimukset. (Betoninormit by 50. 2004, 103.)

Rakenneluokat

Betonirakenteet jaetaan suunnittelun ja työnjohdon pätevyyden perusteella kolmeen rakenneluokkaan 1, 2 ja 3, betoninormien By 50 kohdan 1.1 mukaisesti. Vaativin on rakenneluokka 1, jota käytetään muun muassa jännitettyjä rakenteita valmistettaessa. (Betonitekniiikan oppikirja by 201. 2004, 19.)

Rasitusluokat

Rasitusluokat määritetään rakenteille ympäristöolosuhteiden mukaan. Rasitusluokkia on 18 ja ne jaetaan 5 kokonaisuuteen:

- **Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä, X0-luokka**
 - o Ympäristö ei rajoita rakenteen käyttöikää. Betonissa ei ole raudoitusta tai raudoitettu rakenne on kuivissa olosuhteissa, eikä pakkarasitusta ole.

- **Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio, XC-luokat**

- o Betoni suojaa raudoitusta korroosiolta sekä fysikaalisesti että kemiallisesti. Kemiallinen suoja perustuu betonin korkeaan emäksisyyteen (pH noin 13 - 14), jolloin teräksen pinnalle muodostuu tiivis oksidikalvo. Betonin emäksisyys laskee, kun se reagoi ilman hiilidioksidin kanssa. Tätä kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Raudoituksen kemiallinen suoja häviää, kun betonin pH laskee alle 9 ja tällöin teräksen korroosio voi alkaa. Karbonatisoitumisnopeus riippuu ympäristöolosuhteista, betonin koostumuksesta ja betonipeitteen paksuudesta.

- **Kloridien aiheuttama korroosio, XD- ja XS-luokat**

- o Kloridit voivat käynnistää teräskorroosion, huolimatta betonin emäksisestä ympäristöstä. Teräskorroosion aiheuttama terästen poikkipinnan pieneneminen ja korroosiotuotteiden aikaansaama betonipeitteen lohkeamien lyhentävät oleellisesti rakenteen elinikää. Raudoituksen riittävä betonipeite, mahdollisimman tiivis betoni sekä pienet halkeamaleveydet ovat paras suoja kloridien aiheuttamaa korroosiota vastaan.

- **Jäätymis-sulamisrasitus, XF-luokat**

- o Pakkasrapautumisen betonissa aiheuttaa pääasiassa kapillaarihuokosissa jäätyvä vesi. Betoniin kohdistuva pakkasrasitus voimistuu, kun mukana on suoloja. Suolojen vaikutuksesta kosteutta imeytyy betoniin entistä alhaisemmissa lämpötiloissa ja suolat kasvattavat jäätymispainetta. Betonin pakkasenkestävyyttä voi parhaiten parantaa betonin huokostamisella.

- **Kemiallinen rasitus, XA-luokat**

- o Betonin kemiallinen vaurio johtuu Suomessa yleensä siitä, että betoniin kulkeutuu ympäristöstä aineita, jotka joko happamina liuottavat sementin hydrataatiotuotteita ja heikentävät niiden ominaisuuksia tai paisuttavat sementtikiveä ja sitä kautta vaurioittavat rakennetta. Kemiallisen korroosion edellytyksenä on,

että haitallisten aineiden lisäksi betonissa on vettä jossain muodossa. Tyypillisimpiä betonille vahingollisia aineita ovat esimerkiksi sulfaatit, hapot ja aggressiivinen hiilidioksidi.

(Betonin rasitusluokat lyhyesti, 2012)

Mahdollisimman tiivis betoni on paras tapa hidastaa haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin ja siten parantaa betonin kemiallista kestävyyttä. Betonin sulfaatin kestävyyttä voidaan parantaa myös valitsemalla sideaineeksi SR-sementti. (Betonin rasitusluokat lyhyesti, 2012)

Käyttöikä

Kun rakenteelle on määritetty suunnittelukäyttöikä ja rasitusluokat, on käyttöikämitoituksessa käytettävissä kaksi menetelmää.

Yksinkertaisessa taulukkomenetelmässä betonin koostumukselle ja ominaisuuksille asetetaan vähimmäisvaatimukset rakenteen suunnittelukäyttöiän ja rasitusluokan mukaisesti. Vaatimuksia on suurimmalle vesi-sideainesuhteelle, alhaisimmalle lujuusluokalle ja pienimmälle sementtimäärälle, sekä pakkasrasitetuissa rakenteissa myös betonin ilmamäärälle. Taulukot löytyvät 50 ja 100 vuoden käyttöiälle. Koostumusvaatimusten lisäksi raudoituksen betonipeite- ja maksimi halkeamaleveysvaatimusten tulee täyttyä. (Käyttöikämitoituksen menetelmät, 2012)

Laskennallisella menetelmällä voidaan tehdä käyttöikämitoitus pakkasenkestävyyden ja karbonatisoitumisen suhteen 50 - 200 vuoden käyttöiälle. Menetelmä mahdollistaa tehokkaan optimoinnin betonin koostumuksen, rakenneyksityiskohtien, työnsuorituksen, säärasituksen ja huoltotoimenpiteiden suhteen. Lisäksi myös halkeamaleveysvaatimusten tulee täyttyä. (Käyttöikämitoituksen menetelmät, 2012)

Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Koostumus ja ominaisuudet	Rasitusluokat																	
	Ei korroosi on tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridin aiheuttama korroosio						Jäädäyys-sulatus-rasitus				Aggressiiviset kemialliset ympäristöt		
		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Suurin v/s-suhte						0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,60		0,50		0,50	0,45	0,40
Vähimmäislujuusluokka	K15	K25	K30	K30	K35	K40	K45	K45	K35	K35	K45					K40	K45	K50
Vähimmäissementin määrä (kg/m³)	-	200	230	250	270	300	320	320	300	300	320	270		300		300	320	330
Betonipete ¹⁾ (mm)	10/10	10/20	20/30	25/35	25/35	30/40	35/45	40/50	30/45	35/45	40/50							
F-luku ²⁾												1,0		1,5				
P-luku (vähimmäisarvo)													25		40			
Muut vaatimukset																		Sulfaattikestävä sementtiä ³⁾

Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 100 vuotta.

Koostumus ja ominaisuudet	Rasitusluokat																	
	Ei korroosi on tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridin aiheuttama korroosio						Jäädäyys-sulatus-rasitus				Aggressiiviset kemialliset ympäristöt		
		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Suurin v/s-suhte						0,45	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,60		0,50		0,50	0,45	0,40
Vähimmäislujuusluokka	K15	K25	K35	K40	K45	K40	K45	K45	K35	K35	K45					K40	K45	K50
Vähimmäissementin määrä (kg/m³)	-	200	230	250	270	300	320	320	300	300	320	270		300		300	320	330
Betonipete ¹⁾ (mm)	10/10	10/20	20/30	25/35	25/35	30/40	35/45	40/50	30/45	35/45	40/50							
F-luku ²⁾												2,0		3,0				
P-luku (vähimmäisarvo)													50		80			
Muut vaatimukset																		Sulfaattikestävä sementtiä ³⁾

KUVIO 1. Betonin koostumuksien ja ominaisuuksien raja-arvoja eri käyttöikäluokissa (Valmisbetonihinnasto Jyväskylä. 2012. 20)

Vesi-sideainesuhde

Betonin lujuus riippuu ennen kaikkea betonin vesi-sideainesuhteesta, jolla tarkoitetaan betonin sisältämän vesimäärän ja sideaineiden, eli yleisimmin sementin painon suhdetta. Veden lisääminen betoniin parantaa työstettävyyttä, mutta mitä enemmän betonissa on vettä, sitä alhaisempi on sen lujuus. Jos betonin työstettävyyttä parannetaan veden lisäyksellä, on toivotun lujuuden saavuttamiseksi lisättävä myös sideainetta. (Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhdesta, 2012)

Pieni vesimäärä sideaineen määrään verrattuna takaa betonille sekä hyvän lujuuden että hyvän tiiviyyden. Tiivis betoni on yleensä myös hyvin säilyvä betoni. Betonin pakkasenkestävyyden parantaminen edellyttää kuitenkin huokos-

tavien lisäaineiden käyttöä. Huokostimet muodostavat betoniin pieniä ilmakuplia, jotka antavat jäätyvälle vedelle tilaa laajeta ilman, että betoni vaurioituu. Myös sementtilaadulla, sekä kiviainesten ominaisuuksilla on vaikutusta betonin ominaisuuksiin. (Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta, 2012)

Massan lämpötila

Betoni on plastisessa tilassa sitoutumiseen asti, mikä tapahtuu noin 2 - 4 tuntia sekoituksesta +20 °C lämpötilassa. Koska kyseessä on kemiallinen reaktio, tarkoittaa 10 °C muutos reaktioajan puoliintumista, tai kaksinkertaistumista. Käytettäessä lämmintä massaa sitoutuminen siis tapahtuu nopeasti ja työstö-aika jää lyhyeksi, kun taas kylmässä sitoutuminen voi kestää huomattavan kauan. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 69.)

Myös vesi-sideainesuhde ja betonimassan sisältämät lisäaineet vaikuttavat sitoutumisreaktion nopeuteen.

2.5 Kuljetus

Betoni kuljetetaan valmisbetonitehtaalta työmaalle yleensä pyörintäsäiliöautolla. Yleisimmän pyörintäsäiliöautotyypin suurin sallittu kuormakoko on 5 - 8 m³ betonia. Pyörintäsäiliöauton hyviä puolia ovat mahdollisuus lisätä haluttu lisäaine betonimassan sekaan matkan aikana tai työmaalle saavuttaessa sekä mahdollisuus sekoittaa kuljetuksen aikana huonontunut betoni jälleen tasalautaiseksi. Myös betonin notkeutta voidaan tarvittaessa lisätä työmaalla valun aikana, sekoittamalla massa pyörintäsäiliöautossa notkistavaa lisäainetta. On muistettava, että betoniin ei saa lisätä vettä, sillä lisäys aiheuttaa betonin lujuuden alenemisen. Myös allasautoja käytetään betonin kuljetukseen mutta niiden käyttö on nykyään vähäistä. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

Betonia voidaan siirtää työmaalla usealla eri laitteella. Pyörintäsäiliöauton varustuksena voi olla mekaaninen tai hydraulinen valukouru, eli ränni ja kourun lisäksi hihnakuljetin tai betonipumppu. Lisäksi voidaan käyttää erillistä betonipumppuautoa. Erilaiset betonin siirtomahdollisuudet kannattaa selvittää valmisbetonitoimittajan kanssa jo valujen suunnitteluvaiheessa. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

Valukouru on edullisin ja käyttökelpoinen betoninsiirtotapa silloin, kun betoni-auto pääsee aivan valukohteen viereen sekä silloin, kun otetaan pieni betonimäärä esimerkiksi muovin päälle maahan. Valukourun ulottuvuus on mekaanisilla kouruilla 3 - 4 metriä ja hydraulisilla kouruilla jopa 9 metriä. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

Hihnakuljettimella betonia voidaan siirtää myös loivasti ylöspäin. Hihnakuljetimen avulla voidaan valaa myös vaaka- ja nauhamaisia rakenteita kuten laattoja ja anturoita. Hihnakuljetimen ulottuvuus on mallista riippuen 10 - 14 metriä. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

Betonin pumppaus on siirtotavoista nopein ja kätevin. Pumpulla varustettu pyörintäsäiliöauto sopii erityisesti pieniin valuihin, hyvän ulottuvuuden ja autobetonipumppua pienemmän tilatarpeen ansiosta. Sen mukana voidaan kuljettaa 3,5 – 6 m³ betonia. Jos betonia tarvitaan tätä enemmän, niin lisäbetoni voidaan kuljettaa työmaalle muilla betoniautoilla, purkaa pumpulla varustetun pyörintäsäiliöauton vastaanottosuppiloon ja pumpata valukohteeseen. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

Pumpulla varustettuja pyörintäsäiliöautoja ei ole vielä kaikilla valmisbetonitoimittajilla, joten autobetonipumppua käytetään yleisesti omakotityömailla varsinkin silloin, kun betonin siirrossa tarvitaan yli 20 metrin vaakaulottuvuutta. Erillisen autobetonipumpun siirtoetäisyys vaakasuunnassa ulottuu noin 40 metrin etäisyydelle ja lisäulottuvuutta on mahdollista saada jatkolinjalla. Erillistä autobetonipumppua käytettäessä on varauduttava siihen, että pumppu voidaan tukea sivusuunnassa tukijaloilla, jotka ulottuvat 2 - 3,5 metrin päähän autosta. Pumppu ja betonia vastaanottosuppiloon purkava betonauto vaativat yhteensä noin 20 metriä pitkän tilan käyttöönsä. (Betonin kuljetus ja siirto, 2012)

2.6 Betonointi

Betonin valaminen on ongelmattominta tavallisessa noin +20 °C huonelämpötilassa. Betonimassa valetaan muottiin huolellisesti tiivistäen, jolloin betonirakenne saadaan halutun muotoiseksi. Rakenteen vetolujuuteen voidaan puolestaan vaikuttaa lisäämällä raudoitusta. Koska kovettumisreaktio, eli hydrataatioreaktio tapahtuu sementin ja veden välillä, betoni kovettuu myös

kosteissa olosuhteissa. Betonia voidaan valaa jopa veden alla, esimerkiksi meren pohjassa. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Betonimassan työstettävyyssaikaa, eli aikaa ennen kuin tuore betonimassa alkaa sitoutua, voidaan säädellä suhteuttamisella, massan lämpötilalla sekä lisäaineilla.

Jälkihoito ja suojaus

Valettu betoni on jälkihoidettava eli pidettävä kosteana ja suojattuna, koska betonin kovettuminen vaatii kosteutta ja liian nopea kuivuminen kasvattaa halkeiluriskiä. Jälkihoitotoimenpiteet riippuvat valetusta betonirakenteesta, sen koosta ja muodosta, käytetystä betonilaadusta sekä ympäröivistä olosuhteista. Muottia vasten olevissa pinnoissa kosteus säilyy itsestään, mutta avoimet yläpinnat on kasteltava valua seuraavina päivinä. Betonipinnan jatkuva kastelu takaa varmimmin betonin kovettumisen vaatiman kosteuden. Kastelua ei voida käyttää talviolosuhteissa, sillä viileä vesi jäähdyttää betonipintaa ja voi näin synnyttää halkeilua aiheuttavia lämpötilaeroja. (Jälkihoito, 2012)

Betonipinnan peittäminen on huolellisesti tehtynä hyvä jälkihoitomenetelmä. Valun pintaa ei tarvitse lisäkastella betonista haihtuvan kosteuden tiivistyessä muovin ja pinnan väliin, kunhan peittäminen vain on tehty mahdollisimman nopeasti valun jälkeen eli heti kun betoni kestää kävelemisen. Lisäksi suojaavan muovin saumakohdat tulee teipata tai muilla keinoin estää tuulen puhaltaminen muovin alle. Jos peittäminen tehdään heti valun jälkeen tai jo sen aikana, estää se myös plastisten kutistumishalkeamien syntymisen. Pintaa kastelemalla plastisia kutistumishalkeamia, jotka syntyvät heti valun jälkeen, ei voida ehkäistä, sillä kastelu tai sumuttaminen voidaan aloittaa vasta, kun vesi ei enää huuhto sementtiä ja hienoainesta pinnasta. Muovikalvolla peittämisen etuna on mahdollisuus suojata tuore pinta sateelta. Kun betonipinnalle ei lisäksi kerry vesikerrosta, tapahtuu kuivuminen pinnoituskosteuteen nopeammin. (Jälkihoito, 2012)

Nestemäisten ruiskutettavien jälkihoitoaineiden tarkoituksena on muodostaa betonin pinnalle lähes täysin kosteutta läpäisemätön kalvo. Koska aineiden tehokkuudessa on käytännön kokeissa havaittu olevan melkoisiakin eroja, on syytä varmistaa valmistajalta tai myyjältä tuotteen ominaisuudet. Heti valun

jälkeisen kosteuden haihtumisen estävän ruiskutettavan jälkihoitoaineen yhteydessä voidaan jälkihoidon onnistuminen varmistaa muovipeitolla, tai käyttämällä tehokkaita, betonin pintaan telattavia jälkihoitoaineita. Jälkihoitoaineita käytettäessä on myös tärkeää varmistaa onko aine itsestään haihtuvaa, vai joudutaanko se poistamaan mekaanisesti tartunnan parantamiseksi, jos betonipinta käsitellään myöhemmin esimerkiksi maalauksella tai pinnoitteella. (Jälkihoito, 2012)

2.7 Betonin lujuudenkehitys

Betonin lujuus puristustilanteessa on korkea ja lujuutta voidaan säädellä veden ja sementin suhteelliseen osuuteen vaikuttamalla. Perusperiaatteena on; mitä enemmän sementtiä ja vähemmän vettä, sen suurempi lujuus. (Mitä betonin valmistuksessa tehdään, 2012)

Muita betonin loppulujuuteen vaikuttavia seikkoja ovat sementin laatu, kovettumislämpötila, kiviaineksen laatu ja rakeisuus, jälkihoito, massan kovettumisikä, seos- ja lisäaineet, veden laatu sekä massan tiivistys. (Betonin lujuus, 2012)

Lujuuden yksikkönä käytetään megapascalialla (MPa) $1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN/m}^2$

Sitoutuminen

Betonin kovettumisen alkutapahtumaa kutsutaan sitoutumiseksi. Sitoutumisessa tuore betonimassa alkaa hyytelöityä ja menettää plastisuuttaan. Sitoutumisaika riippuu sementtityypistä ja lämpötilasta. Betonimassan lämpötilan noustessa sitoutumisaika lyhenee ja hydrataatioreaktio nopeutuu. Sitoutumisvaiheessa olevaa betonia ei saa häiritä, sillä silloin muodostuneet hydrataatiotuotteet rikkoontuvat ja seurauksena voi olla lujuuskato. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 51.)

Lujuudenkehityksen arviointi ja mittaaminen

Betoni lujuus arvostellaan yleensä 28 vuorokauden iässä, vaikka lujuudenkehitys jatkuu vielä pitkään sen jälkeen. Betoni jaetaan lujuutensa perusteella puristuslujuusluokkiin.

Uusien betonistandardien myötä ollaan siirtymässä lujuuden ilmoittamisessa entisistä K-lujuuksista (150 mm:n kuutiolujuus) C-lujuuksiin (100 mm:n lieriölujuus). Siirtymä kautena voidaan betonin lujuusmerkintänä käyttää esimerkiksi merkintää C25/30, jolloin 25 tarkoittaa uutta lieriölujuutta ja 30 vanhaa kuutiolujuutta. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 2)

Jos betonin kelpoisuus osoitetaan särmältäään 100 mm kuutiolla, koetulokset muunnetaan särmältäään 150 mm kuutiolujuutta vastaaviksi tuloksiksi jakamalla yksittäiset koetulokset luvulla 1,03. (SFS 7022. 7)

Lujuus-luokka	Lujuus-luokka SFS-EN 206-1 mukaan	Alin 150x300 lieriöillä määrätty ominaislu- juus $f_{ck,cyl}$ [MN/m ²]	Alin 150 mm:n kuuti- olla määrätty ominaislujuus K [MN/m ²]	Alin 100 mm:n kuutiolla määrätty ominaislujuus K [MN/m ²]
C12	C12/15	12	15	15,5
C16	C16/20	16	20	20,6
C20	C20/25	20	25	25,8
C25	C25/30	25	30	30,9
C30	C30/37	30	37	38,1
C35	C35/45	35	45	46,4
C40	C40/50	40	50	51,5
C45	C45/55	45	55	56,6
C50	C50/60	50	60	61,8
C55	C55/67	55	67	69,0
C60	C60/75	60	75	77,2
C70	C70/85	70	85	87,6
C80	C80/95	80	95	97,8
C90	C90/105	90	105	108,2

KUVIO 2. Betonin lujuusluokat eri koekappaleilla (Betoninormit by50. 2012, s.107)

Betoniteollisuuden käyttämät lujuudet ovat yleensä K30 - K60 (C25/30 - C50/60). Korkealujuusbetonit ovat K70 - K100 (C55/67 - C100/115). (Betonin lujuus, 2012)

Tavallisen betonimassan lujuudenkehitystä arvioidaan työmaaolosuhteissa tietokoneohjelmilla, laskemalla (Sadgroven ja Nykäsen menetelmät), kypsyyksimittareilla, ainetta rikkomattomilla mittareilla (kimmoisuusmittaus), po-raamalla koekappaleita tai tekemällä valun kanssa samoissa olosuhteissa säilytettäviä "olosuhdekoekappaleita".

2.8 Betonointi kylmissä olosuhteissa

Kovettuvan betonin lujuudenkehitys riippuu ratkaisevasti lämpötilasta. "Normaalit" betonimassat saavuttavat tavoitelujuutensa 28 vuorokauden iässä

lämpötilan ollessa +20 °C. Korkeammassa lämpötilassa tavoitelujuus saavutetaan nopeammin, kun taas matalammissa lämpötiloissa tavoitelujuuteen päästään hitaammin.

Erityisen vaarallista lujuuden kehitykselle on betonin jäätyminen varhaisessa vaiheessa. (Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 341.)

Jäätyminen voidaan estää lämmittämällä ja suojaamalla betonia sekä käyttämällä pakkasbetonia. Betonin yleinen jäätymislujuus on 5 MPa, jonka saavuttamisen jälkeen jäätyminen ei aiheuta merkittävää haittaa betonin loppulujuuteen.

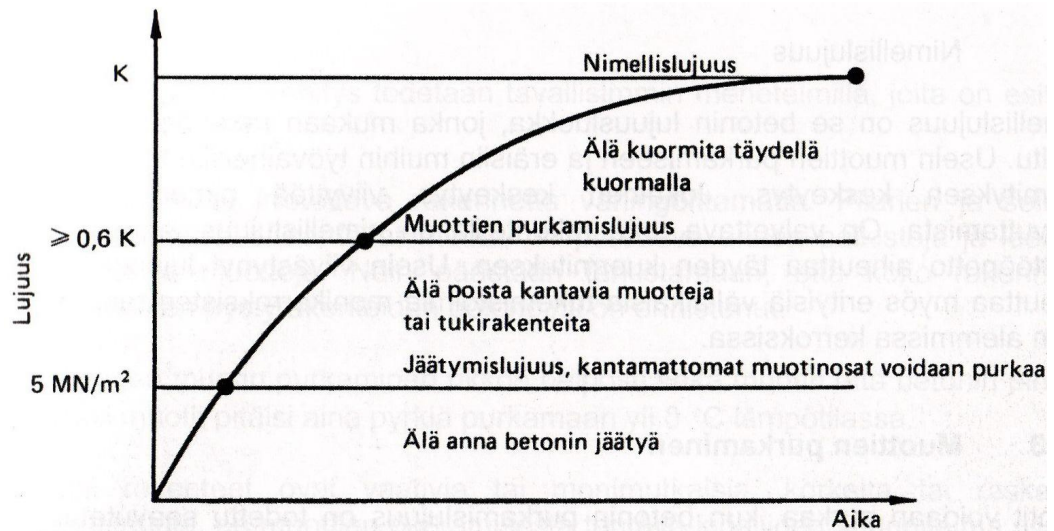
Pelkästään lämpimän betonimassan käyttäminen ei estä jäätymistä, sillä kylmä elementtipinta jäähdyttää nopeasti ohuen valun. Tämän vuoksi saumoissa on käytettävä pakkasbetonia tai huolehdittava riittävästä lämmittämisestä ja suojaamisesta. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 2)

Kylmissä olosuhteissa betonoitaessa tulee huomioida kolme tärkeää lujuudentarkastushetkeä.

- Jäätymislujuuden saavuttaminen
- Muottien purkulujuuden saavuttaminen
- Nimellislujuuden saavuttaminen

(Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 347.)

Kun betonimassa jäätyy, syntyy siihen valelujuutta, joka katoaa jään sulaessa. Valelujuus saattaa olla 10 - 20 MPa. Lujuuskehitys näyttää alkuvaiheessa normaalilta. (Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 346.)



KUVIO 3. Betonin lujuudenkehityksen tärkeimmät tarkastushetket (Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 347.)

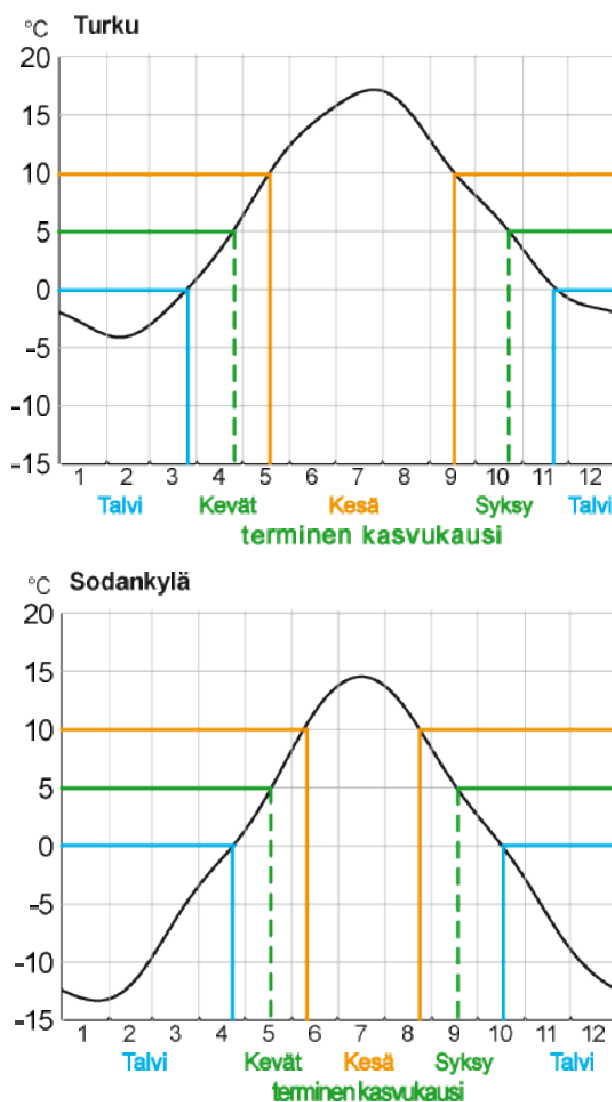
Lahdessa sortui vuonna 1963 rakenteilla ollut ja jo harjakorkeutensa saavuttanut 9- kerroksinen asuinrakennus. Onnettomuus johtui useista talvibetonoinnissa tehdyistä virheistä, joista merkittävin oli betonimassan jäätyminen kovettumisen alussa.



KUVIO 4: Lehtileike Lahti-lehdestä, vuodelta 1963 (1963 sortui kerrostalo, 2012)

Betoniteknologian kannalta kylmä kausi käsittää koko sen ajanjakson, jolloin vuorokauden keskilämpötila saattaa laskea alle $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tällöin betonin kovetusreaktiot ovat jo varsin hitaat ja yöpakkaset saattavat aiheuttaa jäätymisvaurioita vastavalettuihin rakenteisiin. (Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 342.)

Suomessa kylmä ajanjakso kestää syys- lokakuun vaihteesta huhti - toukokuuhun, riippuen tarkastellaanko asiaan Etelä- vai Pohjois-Suomen näkökulmasta. Ilmatieteenlaitoksen kuvaajista (kuva 5) voidaan päätellä, että Suomessa joudutaan ottamaan kylmän sään betonointityöhön aiheuttamat ongelmat huomioon lähes jokaisella vähänkään isommalla rakennustyömaalla.



KUVIO 5. Termisten vuodenaikojen ajankohdat Turussa ja Sodankylässä vertailukaudella 1981 - 2010 (Termiset vuodenajat, 2010)

3. TUOREEN BETONIMASSAN OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN

Tärkein tuoreen massan ominaisuus on betonimassan työstettävyyys, jota yleensä arvostellaan massan notkeudella. Notkeus mitataan tavallisesti painumakokeella tai leviämänä. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 69.)

Muita yleisimpiä tuoreelle betonimassalle tehtäviä tutkimuksia ovat tiivistysasteen, tiheyden, ilmamäärän ja lämpötilan mittaamiset. Näiden lisäksi laboratorioissa käytetään joskus notkeuden määrittämiseen myös vebe-mittausta. (SFS-en 12350-1, 2009)

3.1 Notkeusluokat

Notkea betonimassa helpottaa yleensä betonointityötä, mutta massan plastiset ja pitkäaikaiset muodonmuutokset, erottumistaipumus ja halkeiluriski kasvavat. Yleensä kannattaa käyttää niin jäykkää ja suurikivistä massaa, kuin betonointimenetelmä sallii. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 70.)

Nykyään käytössä olevat notkeusluokat otettiin käyttöön vuoden 2005 alussa (ks. taulukko 1)

TAULUKKO 1. Uusi notkeusluokitus (betoninormit by50, 2004)

Notkeus	Notkeusluokka	Painuma
Nesteytetty	S4	160 - 210 mm
Vetelä	S3	100 -150 mm
Notkea	S2	50 - 90 mm
Jäykkä	S1	10 - 40 mm



KUVIO 6. Eri notkeuksisia betonimassoja (Betonin notkeus, 2012)

3.2 Näytteenotto

Näytteen käyttötarkoituksesta riippuen päätetään, otetaanko yksittäis- vai yhdistetty näyte. Näytteenotossa on tärkeää huomioida, että kaikki näytteenottoon tarvittavat välineet on puhdistettava huolellisesti ennen näytteenottoa. (SFS-EN 12350-1, 2009)

3.3 Tuoreen massan ominaisuuksien mittaaminen

Painuma

Painuman mittauksessa tuore betonimassa tiivistetään katkaistun kartion muotoiseen muottiin. Kun kartio vedetään ylös, antaa betonin kokoonpainumamatka mittausarvon betonin notkeudelle. (SFS-EN 12350-2, 2009)

Painuma (h) mitataan ja kirjoitetaan muistiin välittömästi muotin poistamisen jälkeen määrittämällä muotin korkeuden ja kokoonpainuneen koekappaleen korkeimman kohdan erotus. Testi on pätevä vain, jos tuloksena on hyväksyttävä painuma, jossa betoni säilyy riittävästi koossa ja symmetrisessä muodossa. (SFS-EN 12350-2, 2009)

Leviämä

Testi määrittää tuoreen betonin notkeuden mittaamalla sen leviämän tasaisella levyllä, jota on iskutiivistetty. (SFS-EN 12350-5, 2009)

Leviämäpöytä koostuu liikkuvasta saranoidusta pöydästä, joka on tehty tasaisesta kooltaan $(700 \pm 2 \text{ mm}) \times (700 \pm 2 \text{ mm})$ olevasta ylälevystä, jonka päälle betoni voidaan asettaa, sekä jäykästä alustasta, jonka päälle ylälevy voi puto-

ta määrättyltä korkeudelta. Betoni tiivistetään onttoon, katkaistun kartion muotoiseen muottiin. (SFS-EN 12350-5, 2009)

Testissä leviämäpöytä asetetaan tasaiselle, vaakasuoralle alustalle, joka on vapaa ulkopuolisesta tärinästä ja iskuista. Varmistetaan, että saranoitu ylälevy voidaan nostaa oikealle korkeudelle ja sitten pudottaa vapaasti alarajoittimelle. (SFS-EN 12350-5, 2009)

Odotetaan 30 s betonipinnan tasoituksesta ja nostetaan muotti kohtisuoraan ylöspäin kahdesta kädensijasta 1...3 s aikana. Pidetään leviämäpöytä paikoillaan seisomalla etureunan jalkatuella ja nostetaan hitaasti ylälevyä kunnes se koskettaa ylärajoitinta niin ettei ylälevy iskeydy kovasti rajoitinta vasten. Annetaan levyn pudota vapaasti alarajoitinta vasten. Toistetaan tämä suoritus 15 kertaa niin että kukin kestää 1...3 s. Levinneen betonin suurimmat mitat mitataan kahdessa, pöydän levyjen kanssa yhdensuuntaisessa suunnassa $d1$ ja $d2$ ja merkitään molemmat mittaustulokset muistiin 10 mm tarkkuudella. Tarkistetaan, onko levinnyt betoni erottunut. (SFS-EN 12350-5, 2009)

Leviämäarvo f saadaan yhtälöstä: $f = (d1 + d2) / 2$

Missä $d1$ on levinneen betonin suurin mitta pöydän levyn kanssa yhdensuuntaisessa suunnassa, $d2$ on levinneen betonin suurin mitta pöydän levyn kanssa toisessa yhdensuuntaisessa suunnassa. Tulos ilmoitetaan 10 mm tarkkuudella. (SFS-EN 12350-5, 2009)

Tiheys

Tiheyden määrittämiseen tarvitaan vesitiivis astia, joka on riittävän jäykkä säilyttääkseen muotonsa, valmistettu sementin vaikutukset kestävästä metallista sekä sisäpinnaltaan sileä ja reunoiltaan tasaiseksi työstetty. Astian pohjan ja reunan tulee olla kohtisuorassa toisiinsa nähden ja pienin sisämitta tulee olla vähintään neljä kertaa niin suuri kuin betonin karkean runkoaineen nimellinen maksimiraekoko, mutta kuitenkin vähintään 150 mm. Astian tilavuus ei saa olla pienempi kuin 5 l. (SFS-EN 12350-6, 2009)

Astia kalibroidaan, jotta saadaan selville astian tilavuus (V). Astian massa ($m1$) määritetään punnitsemalla ja tulos merkitään muistiin. Betonin notkeudesta ja tiivistämismenetelmästä riippuen astia tulee täyttää kahdessa tai use-

ammassa kerroksessa, jotta saadaan aikaan täydellinen tiivistyminen, lukuun ottamatta itsetiivistyvää betonia, jolloin astia tulee täyttää yhdellä kerralla. (SFS-EN 12350-6, 2009)

Betoni tulee tiivistää välittömästi astiaan laittamisen jälkeen siten, että aikaan saadaan betonin täydellinen tiivistyminen ilman liiallista erottumista tai sementtikalvon muodostusta. Jokainen kerros tulee tiivistää. Täydellinen tiivistyminen on aikaansaatu mekaanisella tärytyksellä, kun betonin pinnalle ei enää ilmaannu isoja ilmakuplia, pinta muuttuu suhteellisen sileäksi ja ulkonaoltiaan kiiltäväksi, eikä liiallista erottumista esiinny. (SFS-EN 12350-6, 2009)

Kun ylimmäinen kerros on tiivistetty, se tasataan teräshiertimellä tai -lastalla astian yläpinnan tasolle. Pinta tasoitetaan suorareunaisella tasoitusviivaimella ja pyyhittää astian reuna ja ulkopinta puhtaaksi. Astia sisältöineen punnitaan ja saatu massa (m_2) merkitään muistiin. (SFS-EN 12350-6, 2009)

Tiheys lasketaan yhtälöstä: $D = (m_2 - m_1) / V$

Missä D on tuoreen betonimassan tiheys (kg/m^3), m_1 on tyhjän astian massa (kg), m_2 on tiivistetyllä betonilla täytetyn astian massa (kg), V on astian tilavuus (m^3). Tuoreen betonimassan tiheys ilmoitetaan pyöristettynä lähimpään 10 kg/m^3 . (SFS-EN 12350-6, 2009)

Tiivistymisaste

Tuore betoni laitetaan tasoituslastaa käyttäen huolellisesti, tiivistämistä välttämällä astiaan. Kun astia on täynnä, tasoitetaan betonin yläpinta astian yläpinnan tasalle. Betoni tiivistetään täryttämällä ja etäisyyttä tiivistetyn betonin pinnasta astian yläpintaan käytetään tiivistymisasteen määrittämisessä. (SFS-EN 12350-4, 2009)

Tiivistämisen jälkeen määritetään arvo s , eli tiivistetyn betonin pinnan ja astian yläreunan välisen etäisyyden keskiarvo millimetreinä. Tämä arvo saadaan mittaamalla erotus astian jokaisen sivun keskikohdalta. (SFS-EN 12350-4, 2009)

Tiivistymisaste c saadaan yhtälöstä: $c = h / (h - s)$

Missä h on astian sisäkorkeus (mm), s on tiivistetyn betonin pinnan ja astian yläreunan välisen neljän mitatun etäisyyden keskiarvo (mm). Tulos ilmoitetaan 0,01:n tarkkuudella. (SFS-EN 12350-4, 2009)

Vebe

Vebe menetelmällä määritellään tuoreen betonin notkeus Vebe-ajan perusteella käyttäen Vebe-laitetta. Testissä tuore betoni tiivistetään painumamuottiin, muotti nostetaan irti betonista, läpinäkyvä levy käännetään betonin päälle ja lasketaan varovasti alaspäin, kunnes se koskettaa betonia. Betonin painuma mitataan. Tärypöytä käynnistetään ja mitataan aika, joka kuluu kunnes levy koko alapinnaltaan koskettaa betonia (Vebe-aika). (SFS-EN 12350-3, 2009)

Merkitään muistiin ajanottolaitteella saatu aika sekunnin tarkkuudella. Tämä on Vebe-aika, joka ilmaisee betonimassan notkeuden kokeen aikana. (SFS-EN 12350-3, 2009)

Testi ei sovellu betoneille, joiden kiviaineksen suurin raekoko on yli 63 mm. Jos Vebe-aika on alle 5 s tai yli 30 s on betonin notkeus sellainen, että Vebe-koe on sille soveltumaton. (SFS-EN 12350-3, 2009)

4. BETONIMASSAN LUJUUDENKEHITYKSEN TUTKIMINEN LABORATORIO-OLOSUHTEISSA

4.1 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleina käytetään joko lieriöitä, joiden korkeus on kaksi kertaa halkaisijan verran tai vaihtoehtoisesti tasasivuisia kuutioita. Jokaiselle koekappalemuodolle, kuutiolle, lieriölle ja prismalle, koekappaleen perusmitan d tulee olla vähintään kolme ja puoli kertaa niin suuri kuin betonin kiviaineksen nimellisraekoko. (SFS-EN 12390-1, 2004)

4.2 Muotit

Muottien tulee olla vesitiiviitä ja vettä imemättömiä. Muottien saumat voidaan vedenpitävyyden aikaansaamiseksi päällystää vahalla, öljyllä tai rasvalla. (SFS-EN 12390-1, 2004)

Muotit voivat olla tehty mistä tahansa materiaalista, joka soveltuu betoni-koekappaleiden valmistukseen. Poikkeuksen muodostavat kalibroidut muotit, joiden tulee olla valmistettu teräksestä tai valuraudasta. Jos muotit valmistetaan muista materiaaleista, on saatavilla oltava niiden käyttöön perustuvaa testaustietoa, joka todentaa muottimateriaalin pitkäaikaisvastaavuuden teräksestä tai valuraudasta valmistettuihin kalibroituhiin muotteihin verrattuna. (SFS-EN 12390-1, 2004)

4.3 Valaminen

Ennen täyttämistä peitetään muotin sisäpinta tarvittaessa ohuella kalvolla ei-reaktiivista irrotusainetta estämään betonin kiinnittymistä muottiin. Betonin notkeudesta ja tiivistämismenetelmästä riippuen muotit tulee täyttää kahdessa tai useammassa kerroksessa, jotta saadaan aikaan täydellinen tiivistyminen. (SFS-EN 12390-2, 2009)

Itsetiivistyvälle betonille muotti tulee täyttää yhdellä kerralla eikä mekaanista tiivistystä saa tehdä muotin täytön aikana eikä muotin täyttämisen jälkeen. Betoni tiivistetään välittömästi muottiin laittamisen jälkeen siten, että aikaan saadaan betonin täydellinen tiivistyminen ilman liiallista erottumista tai sementtikalvon muodostumista. (SFS-EN 12390-2, 2009)

Betonimassan tiivistys

Tiivistäminen tehdään jollakin seuraavista välineistä:

- Sauvatärytin, jonka vähimmäisvärähtelytaajuus on 120 Hz (7 200 kierrosta minuutissa) ja jonka halkaisija ei saa olla yli $\frac{1}{4}$ koekappaleen pienimmästä mitasta.
- Tärypöytä, jonka vähimmäisvärähtelytaajuus on 40 Hz (2 400 kierrosta minuutissa).
- Sulloinsauva, joka on poikkileikkaukseltaan pyöreä, teräksestä valmistettu, päistään pyöristetty ja jonka halkaisija on noin 16 mm ja pituus noin 600 mm.
- Sullointanko, joka on poikkileikkaukseltaan neliömäinen, suora, teräksestä valmistettu ja jonka poikkileikkaus on noin 25 mm × 25 mm ja pituus noin 380 mm. (SFS-EN 12390-2, 2009)

Pinnan tasoitus

Poistetaan ylimääräinen betoni muotin yläreunan yläpuolelta käyttäen teräksistä lastaa tai hierrintä ja tasoitetaan pinta huolellisesti. (SFS-EN 12390-2, 2009)

4.4 Lujuuden testaus

Testauskoneen tulee täyttää standardin SFS-EN 12390-4 asettamat ehdot. Jos koekappaleiden mitat tai muodot eivät täytä virallisen standardin vaatimuksia tulee ne hylätä, tasoittaa tai testata erityismenetelmillä. (SFS-EN 12390-3, 2009)

Koekappaleiden valmistelu ja sijoitus

Kaikki testauskoneen kantavat pinnat pyyhitään puhtaaksi ja mahdollinen irtomainen kiviaines tai muu vieras aines puhdistetaan ja poistetaan koekappaleen kuormituslevyjä vasten tulevilta pinnoilta. Koekappaleen ja testauskoneen kuormituslevyjen välillä ei saa käyttää muita välikappaleita kuin lisälevyjä ja välilaattoja. Koekappaleiden pinnoista pyyhitään ylimääräinen kosteus ennen kuin ne asetetaan testauskoneeseen. (SFS-EN 12390-3, 2009)

Kuutiokoekappale keskitetään testauskoneeseen siten, että kuorma kohdistetaan kohtisuoraan valusuuntaa vastaan. Koekappale keskitetään testauskoneen alakuormituslevylle 1 % tarkkuudella kuutiomaisen koekappaleen nimitystä mitasta tai lieriömäisen koekappaleen nimitystä halkaisijasta. Käytettäessä lisälevyjä, ne asetetaan yhdensuuntaisiksi koekappaleen ylä- ja alapinnan kanssa. Kaksipilarisella testauskoneella kuutiomaiset koekappaleet sijoitetaan siten, että valupinta on pilaria kohti. (SFS-EN 12390-3, 2009)

Kuormitus

Valitaan tasainen kuormituksen kasvunopeus väliltä $0,6 \pm 0,2$ MPa / s. Alukuormituksen, joka on korkeintaan noin 30 % murtokuormasta, päätyttyä kohdistetaan kuormitus koekappaleeseen ilman iskua, ja tasaisesti lisäten valitulla vakionopeudella ± 10 %, kunnes kuormaa ei voida enää lisätä. (SFS-EN 12390-3, 2009)

Kun käytetään käsiohjauksella varustettuja koneita, korjataan hallintalaitteista sopivasti säätämällä kuormitusnopeuden pyrkimystä hidastua, kun koekappaleen murto ollaan saavuttamassa. Kirjataan muistiin suurin saavutettu kuorma, kN. (SFS-EN 12390-3, 2009)

Koetulosten ilmoittaminen

Puristuslujuus saadaan yhtälöllä: $f_c = F / A_c$

Missä f_c on puristuslujuus (MPa). F on suurin kuorma murtohetkellä (N). A_c on kuormituksen alaisen koekappaleen poikkileikkauspinta-ala (mm²), laskettuna koekappaleen nimetyistä mitoista. Puristuslujuus tulee ilmoittaa pyöristettynä lähimpään 0,1 MPa:iin (N/mm²). (SFS-EN 12390-3, 2009)

5. PAKKASBETONI

Pakkasbetoni on erikoisbetonilaatu, jota käytetään olosuhteissa, joissa muiden betonilaatujen lujuudenkehitys saattaa heikentyä kylmyyden tai massan jäätyminen seurauksena. Normaalien betonilaatujen huokosrakenne rikkoutuu veden jäätyessä tuoreessa betonimassassa.

Pakkasbetoni on betonia, joka kovettuu pakkasessa eikä jäädy siten, että betonille aiheutuisi vaurioita tai merkittävää lujuuskatoa. Pakkasbetonia ei tule sekoittaa betonin pakkasenkestävyyteen, millä taas tarkoitetaan kovettuneen betonin ominaisuutta. Pakkasbetonin sisältämät jäätyminenestoaineet perustuvat epäorgaanisiin suoloihin, joiden vaikutuksesta mahdollisesti syntyvä jää on liuskeista eikä vaurioita betonia. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

Pakkasbetonin käyttö Suomessa on jatkuvasti lisääntynyt. Se on käytössä myös monissa muissa maissa, joissa ilman lämpötilat edellyttävät tuoreelta betonilta pakkasenkestävyyttä. Lujabetoni Oy on käyttänyt pakkasbetonia jo vuodesta 1986. (Kovanen, 2012)

5.1 Resepti

Pakkasbetoni valmistetaan tavallisesti lujuusluokkaan C25/30 (K30). Koska kyseessä on yleensä juotosmassa, valitaan notkeusluokaksi tavallisesti S4 ja

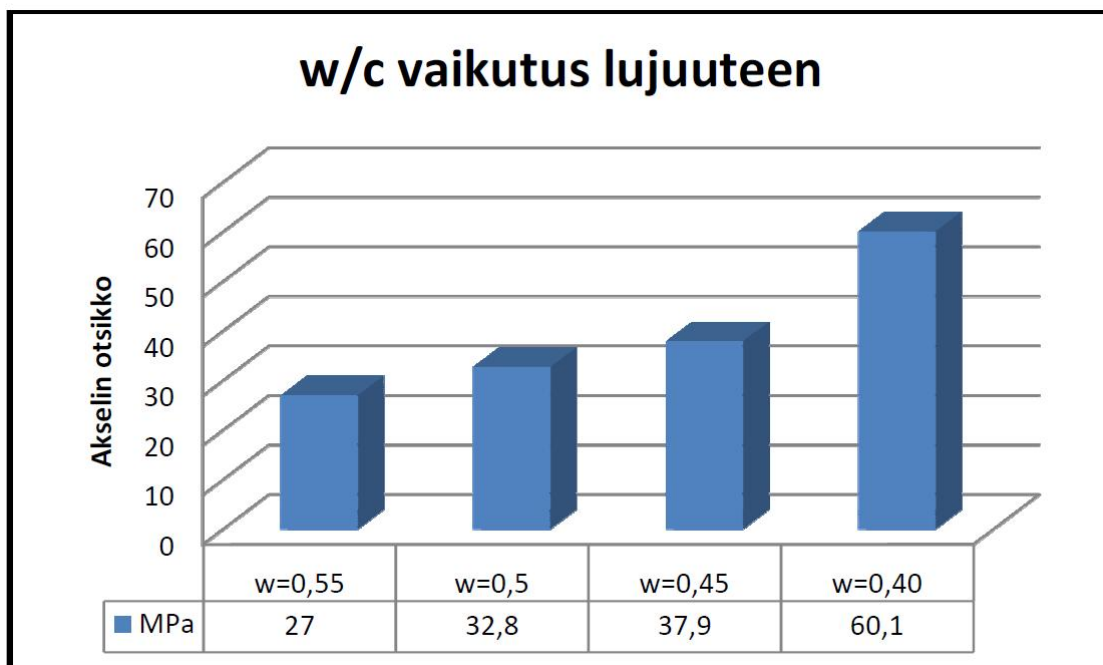
suurimmaksi raekooksi #8. Suurimmat eroavaisuudet tavalliseen juotosmassaan ovat suuri vesi-sideainesuhde ja pakkaslisäaineen käyttö. Kiviainesmäärät ovat suurin piirtein samoja ”normaalimassojen” kanssa. (Kovanen, 2012)

Pilarin ja palkin liitoksessa vaaditaan usein lujuuksia C40/50 - C50/60. Käyttöselosteen omaavia talvijuotosbetoneja on olemassa lujuusluokkaan C50/60 saakka. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 18)

Vesi sementtisuhte

Pakkasbetonissa käytetään pientä vesi-sideainesuhdetta. Betonimassasta saadaan työstettävää käyttämällä notkistinta, joka tekee massasta juoksempaa. (Kovanen, 2012)

Maksimi tehollinen vesi-sideainesuhde on 0,50. Liika vesi laskee pakkaslisäaineen tehokkuutta konsentraation laskiessa. On suositeltavaa käyttää notkistavia ja vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. Suositeltu sementtimäärä on 400 - 450 kg/m³ ja sementtityyppi CEM I – II, 42,5 R tai 52,5 R. (Jääbeto esite. 2011)



KUVIO 7. Vesi-sementtisuhteen vaikutus pakkasbetonin lujuuteen (Jääbeto esite, 2011)

Lisäaineet

Suomessa käytössä olevia pakkaslisäaineita ovat ainakin sakret anti-frost, Antifrost 45, Kollar-frost ja Sementun valmistamat Jääkarhu (jauhe) sekä Jääbeto (nestemäinen). Lisäaineita käyttämällä betonimassa säilyttää ominaisuuksensa aina -15 °C lämpötilaan saakka.

Pakkasbetonin toiminta perustuu veden jäätymispistettä alentavien lisäaineiden käyttöön. Näiden lisäaineiden teho perustuu yleensä ainakin kahteen tekijään. ”Pakkaslisäaineet” muuttavat jään rakenteen liuskeiseksi, jolloin jäätyvä vesi ei vaurioita betonia laajentuessaan. Toiseksi ne pitävät ainakin osan vedestä sulana myös pakkasessa. Näin sementin hydrataatio on mahdollinen, myös betonin lämpötilan laskiessa 0 °C alapuolelle. Toisin sanoen lisäaineilla ei ainoastaan estetä betonin jäätymisen aiheuttamaa lujuuskatoa vaan myös saadaan betoni kovettumaan alhaisissa lämpötiloissa. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

5.2 Valmistus

Pakkasbetoni valmistetaan periaatteessa samalla tavoin kuin normaalit betonimassat. Pakkaslisäaine lisätään sekoitusveden mukana betonimyllyyn tai tarvittaessa valmiiseen betonimassaan. (Jääbeto esite. 2011)

Lisäaineen määrä betonissa riippuu käytössä olevasta lisäaineesta sekä halutusta pakkasenkestosta. Esimerkkinä taulukosta 2 selviävät Lujabetonilla käytössä olevan Antifrost 45 lisäaineen valmistajan suosittelemat suhteet eri lämpötiloilla. (Antifrost 45- esite)

TAULUKKO 2. Pakkaslisäaineen annostus eri lämpötiloille (Antifrost 45- esite, Puola)

Ilman lämpötila °C	Suosittelava annostus
5°C / -5°C	1,0 %
-5°C / -10°C	1,5 %
-10°C / -15°C	2,0-2,5 %

Pakkasessa kovettuvaa betonia on saatavissa sekä kuivasekoitteina että valmisbetonina. (Betoniteknikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

Talvilaatua olevia kuivatuotteita käytetään valmistettaessa saumabetonimassoja työmaalla ja ne vastaavat ominaisuuksiltaan pitkälti pakkasbetonia. Näitä kuivatuotteita valmistetaan yleensä lujuusluokissa C25/30 - C40/50. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 7)

Kuivabetonien toimittajat eivät suosittele lisäaineiden käyttämistä, sillä betonisekoittimeen annosteltavien määrien kontrollointi työmaaolosuhteissa on vaikeaa. Mikäli lisäaineita käytetään, on niiden käyttöohjeita noudatettava huolellisesti. Samalla on myös huolehdittava saumojen riittävästä lämmityksestä, sillä jäätymättömyys ei sinällään takaa lujittumista. Pakkaslisäaineilla on lisäksi usein loppulujuutta alentava vaikutus. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 9)

6. PAKKASBETONIN KÄYTTÖ

Pakkasbetonin käyttö perustuu kylmissä olosuhteissa tehtävän betonointityön suojaus ja lämmityskustannusten sekä tarvittavan työmäärän pienenemiseen. Vuorokauden keskilämpötilan laskiessa alle +5 °C, kannattaa urakoitsijan harkita pakkasbetonin käyttöä betonointikohteessaan, koska siinä lämpötilassa

tavanomaista betonimassaa tulee lämmittää valun onnistumiseksi. Tavanomaisen betonimassan lujuudenkehitys lähes pysähtyy massan lämpötilan laskiessa alle +5 asteeseen. Pakkasbetonin avulla tätä raja-arvoa voidaan laskea lähes -15 asteeseen.

”Pakkasbetoni on edullisimmillaan lämpötiloissa +5 °C ... -5 °C, jolloin se lujittuu vielä melko nopeasti. Alhaisemmissa lämpötiloissa pakkasbetonin kanssa tarvitaan usein lämmitystä, mikä varmistaa riittävän lujuuden kehittymisen.” (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 5)

Pakkasbetoni lujittuu tavallista betonia nopeammin lämpötilan ollessa 0°C lähetyvillä, joten sitä käyttämällä vältetään lujuudenkehityksen hidastumisesta johtuvat ongelmat, joita ovat kustannusten nousu ja töiden, kuten valumuottien purkamisen sekä pinnan viimeistelytöiden viivästyminen. Lujuudenkehityksen hidastuessa vaarana on myös suurempi plastisen halkeilun määrä ja pahimassa tapauksessa koko betonivalun epäonnistuminen. Erittäin suuren riskin muodostavat valut, joissa betonointityö tehdään aiemmin valetun betonin, paljaan maan tai kallion päälle.

Jos tavallinen betonimassa pääsee jäätymään ennen sementin reagoimista, sen tartunta raudoituksiin sekä massan sisältämiin kiviaineksiin heikkenee ja ei toivottujen halkeamien vaara kasvaa. Jäätyessään tavallisesta betonimassasta tulee huokoisempaa ja heikompaa.

6.1 Yleisimmät käyttökohteet

Pakkasbetonin yleisimpiä käyttökohteita ovat kylmässä säässä tehtävät pienet valutyöt, kuten elementtien sauma- ja asennustyöt, harkkoseinien täyttö ja erilaiset korjaus- ja kiinnitysvalut sekä muut pienet valut, joiden lämmittäminen olisi erittäin vaikeaa ja kallista. (Kovanen, 2012)

6.2 Käytön rajoitukset

Pakkasbetoniin ei saa työmaalla lisätä vettä. Tarvittaessa notkeampaa massaa, tulee notkistaminen suorittaa siihen tarkoitettulle lisäaineella, mutta ainoastaan betoniaseman luvalla. (Kovanen, 2012)

Rakenteet

Pakkasbetoni on ensisijaisesti tarkoitettu sauma- ja muihin ”pieniin” valutöihin. Varsinaisia kantavia rakenteita valettaessa käytetään muita betonilaatuja. Pakkasbetoni on myös niin paljon tavallisia betonimassoja kalliimpaa, että sen käyttö isommissa valutöissä ei ole kannattavaa. Myös väärinkäsitysten vaara on ilmeinen valettaessa kantavia rakenteita, koska pakkasbetoninkin lujudenkehitys on erittäin hidasta alle -5 °C lämpötilassa. (Kovanen, 2012)

Käyttöselosteen omaavia talvijuotosbetoneja on lujusluokkaan C50/60 saakka. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 18)

Pakkasrajat

Pakkasbetoni ei ratkaise talvisaumauksen ongelmia sellaisenaan, sillä sen lujudenkehittyminen on pakkasella hidasta ja pysähtyy käytännössä alle -15 °C lämpötiloissa. Pakkasbetoni on edullisimmillaan lämpötiloissa $+5\text{ °C}$... -5 °C , jolloin se lujittuu vielä melko nopeasti. Alemmissa lämpötiloissa pakkasbetonin kanssa tarvitaan usein lämmitystä, mikä varmistaa riittävän lujuden kehittymisen. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 7)

Tuore pakkasbetonimassa säilyy hyvänä aina -15 °C asti. Toistuvat jäätymis- / sulamis-sykliit heikentävät loppulujuutta ($< -15\text{ °C}$). (Kovanen, 2012)

Rasitusluokat

Pakkasbetonin käytölle voi olla rajoituksia eri rasitusluokissa, joten käytettävyyttä on tarkistettava valmistajalta. Yleensä sitä käytetään luokissa XO, XC1, XC2 ja XC3. Käyttö XF1- luokassa vaatii aina erillisselvitystä. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

RakMK:n osan B4 ja betoninormit BY 50:n mukaan pakkasbetonia ei saa käyttää rakenteissa, joille on määritetty rasitusluokka XS 1/2/3, XD 1/2/3, XF 1/2/3/4 tai XA2/3. Pakkasbetonin käyttö on siis kielletty ilman erillisiä selvityksiä suolarasituksen, pakkasuolarasituksen tai kemiallisen rasituksen alaisissa rakenteissa. Pakkasbetonia ei myöskään tule käyttää kohteissa, joissa betonilta vaaditaan pakkasenkestävyyttä.

Poikkeuksena virallisiin ohjeisiin nähden Jääbeto- nimisen pakkaslisäaineen tuotelehdessä tuotteen luvataan sopivan käytettäväksi ilman erillisiä selvityksiä myös rasitusluokassa XA (kemiallinen rasitus). *”Jääbeto sopii käytettäväksi juotos- ja saumausvaluissa. Käyttö on sallittu rasitusluokissa X0, XC ja XA. Luokassa XF1 käyttö on mahdollinen vasta erillisen selvityksen jälkeen.”* (Jääbeto esite. 2011)

Valaminen

Pakkasbetoni voidaan siirtää saumauskohteeseen pumppaamalla tai nostoastian avulla. Pakkasbetoni on normaalibetonia sitkeämpää ja sitoutuu melko nopeasti, joten sitä ei yleensä voi tilata suuria määriä odottamaan pumppausta. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 7)

7. TUOREEN MASSAN OMINAISUUDET

Pakkasbetoni on yleensä notkeusluokaltaan S4 johtuen sen pääasiallisesta käyttötarkoituksesta. Pakkasbetonin vesi-sementtisuhde on alhainen, joten massan notkeus saadaan aikaan käyttämällä notkistavaa lisäainetta. (Lujabetoni, 2012)

Massan ominaisuuksien muuttuminen

Pakkasbetonin sitoutumisreaktioihin ja niiden nopeuteen vaikuttavat erityisesti pakkaslisäaine, matala vesi-sideainesuhde sekä massan lämpötila. Pakkaslisäaine on yleensä myös betonin reaktioita kiihdyttävää, joten työstämisaika jää normaalimassoja lyhyemmäksi. Myös sementti- ja notkistinmäärät ovat isoja, jolloin massan työstettävyyds heikkenee nopeammin. (Kovanen, 2012)

Edellä mainituista syistä pakkasbetonia ei suositella kuljetettavan pitkiä matkoja ennen valamista. Erityisen lyhyeksi työstöaika jää massan lämpötilan ollessa korkea. Työstettävyytsaika puolestaan pitenee, jos massan lämpötila laskee. (Kovanen, 2012)

8. VAIKUTUKSET BETONOINTITYÖHÖN

Pakkasbetoneja käytettäessä betonin kuljetus, betonointi ja betonin jälkihoito tehdään suunnilleen, kuten normaalibetoneillakin. Erityistä huomiota on kuitenkin kiinnitettävä siihen, ettei saumoissa ole lunta tai jäätä. (Betonitekniiikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

Työohjeet betonoitaessa pakkasbetonilla (Lujabetoni, 2012)

- Puhdista muotti ja teräkset jäältä ja lumesta
- Höyrytys
- Älä päästä pintoja jäätymään
- Suojaa valu => pidä lämpimänä jos pystyt
- Kriittisiin paikkoihin lankalämmitys
- Muutoin normaali betonointi: tiivistys, hierto...

8.1 Työstöaika

Pakkasbetoni kovettuu nopeasti lämpötilan ollessa yli 0 °C, joten tällöin työstöaika jää lyhyehköksi. (Betonitekniiikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

Pakkasbetonin työstöaika eri lämpötiloissa on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Pakkasbetonin työstöaika (Kovanen, 2012)

+5 °C → +20 °C	Työstettävyyys menetetään nopeasti.
-5 °C → +5 °C	Työstettävyyysaika noin tunti.
-15 °C → -5 °C	Työstettävyyysaika noin kaksi tuntia
<-15 °C	Käyttö ei sallittu.

Pakkasbetonimassan lämpötila, sen saapuessa työmaalle on noin 15 °C.

8.2 Notkeusluokat

Pakkasbetonin avulla massa pystytään tilaamaan kylmissäkin oloissa notkeana, koska notkeus aikaansaadaan notkistimella ja betonin reaktiot ovat nopeita.

ta. Tavallinen betonimassa tulee tilata mahdollisimman jäykkänä, lämpötilan lähestyessä +5 °C. Notkeampi massa helpottaa itse valutyötä, varsinkin tehtäessä saumauksia. Pakkasbetoni kannattaa tilata S4- notkeusluokassa. (Kovanen, 2012)

8.3 Kuljetus

Pakkasbetoni on normaalibetonia sitkeämpää ja sitoutuu melko nopeasti, joten sitä ei yleensä voi tilata suuria määriä odottamaan pumppausta. Pakkasbetoni toimitetaan työmaille pienissä erissä ja kuormakoko on maksimissaan 3 m³. (Kovanen, 2012)

8.4 Jälkihoito

Valun jälkeen on suoritettava suojaus ja jälkihoito, aivan kuten käytettäessä normaalibetoneita. Pakkasbetonien jälkihoidossa on huomioitava erityisesti veden haihtumisen estäminen, koska lujuudenkehitys on suhteellisen hidasta. Mikäli pakkasbetoni pääsee kuivumaan liian nopeasti, saattaa betonin pintaan muodostua suolahärmettä. Muovikalvo tai eristysmatto sopii hyvin haihtumisen estäjäksi. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

9. KOVETTUVAN JA KOVETTUNEEN BETONIN OMINAISUUDET

Pakkasbetonikin tarvitsee lämpöä lujuuden kehittymiseen. Pakkasbetoni saavuttaa nimellislujuutensa, kun kypsyyssikä on riittävä. (Lujabetoni, 2012)

Mikäli ilman lämpötila on valuhetkellä tai heti valun jälkeen alle -15 astetta, saattaa pakkasbetoninkin loppulujuuteen tulla lujuuskatoa. (Betonitekniikan oppikirja by 201. 2004, 390.)

Pakkaslisäaineen toimivuuden testaaminen

Pakkasbetonilisäaineen vaikutus testataan ennakkokokeina kuten muidenkin lisä-aineiden vaikutus. Ominaisuus testataan siinä alhaisimmassa lämpötilassa, jonka valmisbetonitehdas ilmoittaa asiakkailleen. Testi tehdään käyttäen sellaista betonikoostumusta, jossa valmistajan myynnissä olevien pakkasbetonilaatujen vesimäärä / betoni-m³ on suurin. (Kovanen, 2012)

Pakkasbetonilisäaineen vaikutus testataan ennakkokokeina seuraavasti:

- Valmistetaan kolme koekappaletta.
- Koekappaleet siirretään heti valun jälkeen muotteineen olosuhdesäilytykseen ja säilytetään ensimmäiset 7 vrk olosuhdesäilytyksessä siinä alhaisimmassa lämpötilassa, missä valmisbetonitehdas takaa pakkasbetoninsa toimivuuden.
- Olosuhdesäilytyksen jälkeen koekappaleita säilytetään 28 vrk normaalisäilytyksessä 20 ± 2 °C. Ensimmäisen normaalisäilytysvuorokauden ajan koekappaleet säilytetään muoteissaan.
- Koekappaleiden puristuslujuus testataan 35 vrk:n ikäisenä.
- Yksittäisen testaustuloksen tulee olla vähintään K-4. (K = Lujuusluokka)
- Kolmen koekappaleen testaustulosten keskiarvon tulee olla vähintään K+4. (K = Lujuusluokka)

Puristuslujuuden toteamisessa pakkasbetonit rajataan omaksi betoniperheekseen. (Kovanen, 2012)

10. LÄMPÖTILAN VAIKUTUS LUJUUDENKEHITYKSEEN

10.1 Lujuudenkehityksen arviointi ja seuranta

Lujuudenkehityksen seuranta perustuu lämpötilojen seuraamiseen. Tavallista betonia käytettäessä lujuudenkehitystä voidaan arvioida laskennallisesti mitattujen lämpötilojen avulla. On olemassa myös tietokoneohjelmia, joiden avulla lujuudenkehitys voidaan arvioida. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 5)

Tavalliselle betonille on olemassa myös kypsyysmittareita. Mittarin asteikolta voidaan lukea likimääräinen kypsyysikä t_{20} , mitä käytetylle betonille laadittuun

lujuudenkehityskäyrään vertaamalla voidaan arvioida betonin lujuus. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 5)

Edellä esitetyt lujuudenkehityksen seurantamenetelmät eivät kuitenkaan sovellu pakkasbetoneille, sillä niille ei toistaiseksi ole pystytty määrittämään lämpötiloja vastaavaa laskennallista lujuudenkehitystä. Näitä betoneita käytettäessä onkin tyydyttävä vertaamaan lämpötiloja betonitoimittajilta saataviin ohjeellisiin lujuudenkehityskäyriin. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

Mikäli saumoja tai laattojen alapuolista tilaa ei ole lämmitetty, riittää ulkolämpötilan seuranta. Lämpötilaseurantaa varten saumabetoniin voidaan asettaa perinteisiä luettavia mittareita, joiden lukemista pidetään erillistä pöytäkirjaa. Seurannassa voidaan käyttää myös sähköiseen mittaukseen perustuvia menetelmiä. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

Sähköinen mittaus perustuu termoelementtipareihin, joissa termoelementtilangan vastusarvo muuttuu lämpötilan mukaan. Termoelementtipari muodostuu kahdesta termoelementtilangasta, joiden eristeettömät päät kierretään yhteen ja yhdistetty pää sijoitetaan saumavaluun lukupäiden jäädessä näkyville. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

Lämpötilaseuranta onnistuu parhaiten yhdistämällä termoelementtiparit jatkuvatoimisiin loggereihin, jotka tallentavat lämpötiloja laitteen muistiin halutuin väliajoin. Lämpötilatiedot puretaan loggerilta tietokoneen avulla. (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 6)

10.2 Tutkimuksen aloitus

Pakkasbetonimassan valmistus

Tutkittava pakkasbetonimassa valmistettiin Jyväskylän Lujabetonin valmisbetoniaseman betonimyllyssä 15.5.2012. Betonin lujuusluokaksi valittiin C25/30, maksimiraekooksi #8 ja massan notkeudeksi S4. Pakkaslisäaineena käytettiin Lujabetonilla käytössä olevaa, saksalaisen Ha-Be GmbH:n valmistamaa Antifrost 45 lisäainetta.

Koekappalaiden teko

Valmis massa valettiin 100mm*100mm*100mm kokoisiin koekappalemuotteihin. Muotit öljyttiin tarkoitukseen soveltuvalla muottiöljyllä, jolla estettiin betonin kiinnittyminen muotteihin. Muotit täytettiin määräysten mukaan kahdessa kerroksessa ja tiivistettiin käyttämällä sauvatärytintä.

Muoteista noin puolet oli muovimuotteja ja puolet rautaisia. Valamisen jälkeen koekappaleet siirrettiin suunnitelmien mukaisesti jo valmiiksi tutkimuslämpötiloihin säädettyihin pakastimiin.



KUVIO 8. Rautamuotti

Betonimassan testaaminen

Tuoreesta betonimassasta mitattiin painuma, leviämä, tiheys, ilmamäärä sekä lämpötila. Massan painuma ja lämpötila mitattiin myös 30 minuutin sekä 60 minuutin jälkeen massan valmistumisesta, jotta saataisiin selvitettyä aika, jonka massa säilyisi ominaisuuksiltaan työstettävänä valmistumisen jälkeen.

60 minuutin jälkeen sitoutuminen oli jo niin pitkällä, etteivät mittaukset enää onnistuneet. Tämä johtui luultavasti melko korkeasta ulkolämpötilasta (noin +10 °C) verrattuna pakkasbetonin yleisiin käyttölämpötiloihin. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että pakkasbetonin sitoutumisreaktiot ovat nopeita ja täten työstettävyyensaika on erittäin lyhyt. Taulukosta 4 selviävät tutkitut tuoreen betonimassan ominaisuudet.



KUVIO 9. Muotti painuman mittausta varten

TAULUKKO 4. Koetulokset tuoreen betonimassan ominaisuuksista

Aika	heti	30 min	60 min	90 min
Paimuma	260	220	Ei testattu	Ei testattu
Leviämä	550			
Tiheys	2265			
Ilmamäärä	4,2			
Lämpötila	16	17	Ei testattu	Ei testattu

10.3 Tutkimuksen eteneminen

Koekappaleiden jäähdyttäminen

Tutkittavat kappaleet jäähdytettiin suunniteltuihin tutkimuslämpötiloihin käyttämällä kahta pakastinta sekä kahta jääkaappia. Tutkimuksen edetessä tuli kuitenkin selväksi, ettei normaaleilla pakastimilla ja jääkaapeilla pystytä saavuttamaan täydellisen tarkkaa ja tasaisena pysyvää tutkimuslämpötilaa.

Yksi pakastimista oli varustettu automaattisella termostaatilla (-5 °C), mutta siltikin lämpötilassa tapahtui vaihtelua ja lämpötilaero kyseisen pakastimen ylä- ja alatasolla oli noin 1 °C . Myös lämpimät koekappaleet nostivat hetkellisesti kylmälaitteiden lämpötiloja heti valamisen jälkeen. Lämpötilojen vaihtelut näkyvät selvästi sivulla 43 olevassa taulukossa 5.



KUVIO 10. Automaattitermostaatilla varustettu pakastin ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Toisaalta tuloksia voidaan pitää kohtalaisen luotettavina ja todellista tilannetta havainnollistavina, koska harvoin työmaalla tehtävän betonivalun lämpötila-kaan säilyvät absoluuttisen tasaisena koko betonin lujittumisen ajan.

Oman mausteensa tutkimuksen tekemiseen toi yhden pakastimen hajoaminen ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja siitä johtunut koekappaleiden sulaminen (kts. taulukko 5). Tästä syystä osa lopullisista koekappaleista on valmistettu ja tutkittu Siilinjärven Lujabetonilla.

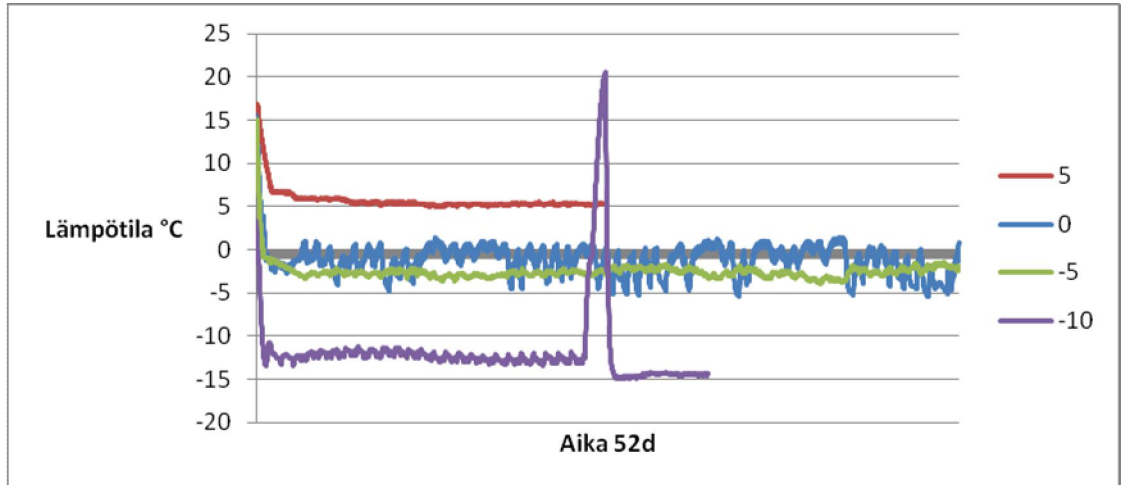
Lämpötilojen seuranta

Tutkimuksessa betonin lämpötilaa seurattiin käyttäen termoelementtipareja ja loggereita. Koekappaleissa olleet anturit lähettivät tiedon koekappaleiden lämpötiloista loggereihin, jotka rekisteröivät jokaisen muutoksen kappaleiden lämpötiloissa. Termoelementtilankoja oli sijoitettu yhteensä kuuteen koekappaleeseen, joista neljä mittasivat pakkaslämpötiloissa olleiden kappaleiden lämpötiloja (2+2). Lämpötiloissa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ oli molemmissa yhdet mitta-anturit.



KUVIO 11. "Loggeri"

TAULUKKO 5. Loggereiden tallentamat lämpötilat Muuramessa testatuille koekappaleille



Koekappaleiden sulatus

Pakkaslämpötiloissa säilytetyt koekappaleet otettiin sulamaan noin tuntia ennen puristuksia, koska jäätyneen betonin lujuus on noin 12 MPa ja puristettaessa jäisiä kappaleita tulokset ovat epäluotettavia, juuri jään aiheuttaman valujuuden takia.

Ensimmäiset pakkaslämpötiloissa olleet koekappaleet otettiin sulamaan puristamista edeltävänä iltana, jolloin kyseiset kappaleet kerkesivät kehittämään

lujuutta, eivätkä tulokset olleet käyttökelpoisia. Oikea sulamisaika selvisi sulattamalla kappale, jossa oli loggerin anturi, jolloin loggeria lukemalla selvisi aika, jonka koekappaleet tarvitsivat sulamiseen.



KUVIO 12. Muovimuotteja odottamassa purkamista

Kyseiset pakkaslämpötiloissa säilytetyt koekappaleet tutkittiin tämän virheen, sekä jo aiemmin mainitun pakastimen hajoamisen vuoksi uudestaan Siilinjärvellä.

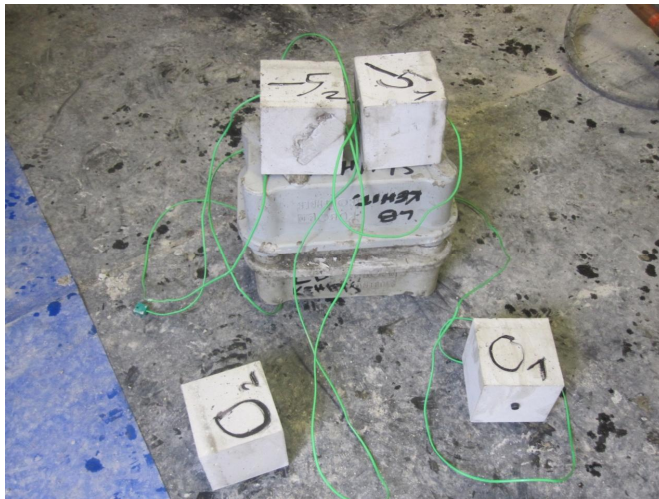
Lujuuden mittaaminen

Koekappaleiden lujuudet tutkittiin puristamalla ne aikataulun mukaisesti Jyväskylän valmisbetoniaseman tutkimuslaitteilla.

Kappaleet punnittiin niiden tiheyden määrittämiseksi, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia, eivätkä mahdolliset virheet tai tiheyspoikkeamat koekappaleissa vaikuttaisi tutkimuksen tuloksiin.



KUVIO 13. Vaaka koekappaleiden punnitsemista varten



KUVIO 14. Koekappaleita odottamassa puristamista

Kappaleen oikeaoppisen asettelun jälkeen käynnistettiin testauskone, joka puristi koekappaletta tasaisesti kasvavalla voimalla, aina sen murtumiseen asti. Testattavan koekappaleen annettua periksi, kirjattiin koekappaleen murtamiseen tarvittu puristusvoima ylös. Muuramen betoniasemalla saadut puristustulokset ovat liitteessä 2 ja Siilinjärven tulokset liitteessä 3.



KUVIO 15. Koekappale valmiina puristamiskoetta varten



KUVIO 16. Puristettu koekappale

Betonin lujuudentestaamiseen tarkoitetusta laitteesta voidaan lukea, kuinka paljon voimaa tarvitaan koekappaleen periksi antamiseen. Tulokset olivat siis muotoa KN. Muuramessa tehdyissä lujuuskokeissa käytettiin valmisbetoniaseman betonilaboratoriosta löytyvää italialaisvalmisteista ja Machine merkistä lujuudentestauskonetta.



KUVIO 17. Lujuudentestauskoneen asteikko (kN)

Saadut tulokset muutettiin megapascaliksi ($\text{MPa} = \text{N} / \text{mm}^2$), jonka jälkeen lujuudet muutettiin vastaamaan $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ kokoisten kuutioiden lujuuksia jakamalla saadut lujuudet luvulla 1,03. Muunnetut ja yhdistetyt tulokset (0°C ja $+5^\circ\text{C}$ Muurame, -5°C ja -10°C Siilinjärvi), voidaan lukea taulukosta 6.

TAULUKKO 6. Muunnetut lujuudet

Lujuudet (MPa) $F_{\text{cu}150}$

ikä (pv)	0	1	3	7	14	28	31	42	56
5	0	5,0	20,5	32,0		45,5			
0	0	3,5	12,5	28,0		42,5			51,0
-5	0			14,3	18,2	25,4		26,0	30,5
-10	0			2,1	3,5	4,6	5,4		8,5

”Jos betonin kelpoisuus osoitetaan särmältäään 100 mm kuutiolla, koetulokset muunnetaan särmältäään 150 mm kuutiolujuuutta vastaaviksi tuloksiksi jakamalla yksittäiset koetulokset luvulla 1,03.” (SFS 7022. 7)

Koetuloksien perusteella laaditut lujuuskäyrät ovat liitteessä 1.

10.4 Lämpötilan vaikutusten arviointi

Kun tarkastellaan tutkimuksessa saatuja tuloksia, voidaan todeta jo etukäteenkin tiedossa ollut asia, eli mitä lämpimämmät olosuhteet, sitä nopeampaa on myös pakkasbetonin lujuudenkehitys.

Huomionarvoista on lujuudenkehityksen radikaali hidastuminen lämpötilan laskiessa alle -5 °C. Monet pakkaslisäainevalmistajat lupaavat pakkasbetonin saavuttavan jäätymislajuuden muutamassa vuorokaudessa, lämpötilan ollessa -15 °C. Esimerkkinä betonielementtien talvisaumausohjeista poimittu ohje seinäelementtien alavaakasaumojen lämmitystarpeen arvioimisesta sekä BY 201:n sivuilta poimittu tieto.

”Seinäelementtien alavaakasaumojen minimilujuus ennen seuraavan kerroksen asennusta on vähintään 5 MPa. Tämän lujuuden saavuttaminen kestää -10 °C lämpötilassa pakkasbetonia käytettäessä ilman lämmitystä noin neljä päivää. Tätä nopeammalla asennustahdilla tai kylmemmällä säällä on vaaka-kaumaa lämmitettävä.” (Betonielementtien talvisaumausohje 2011. 16)

”Jäätymislajuuden 5 MPa saavuttamiseen kuluu -15 asteen lämpötilassa 2...7vrk pakkasbetonityypistä ja lujuusluokasta riippuen.” (Betonitekniikan opikirja by 201. 2004, 390.)

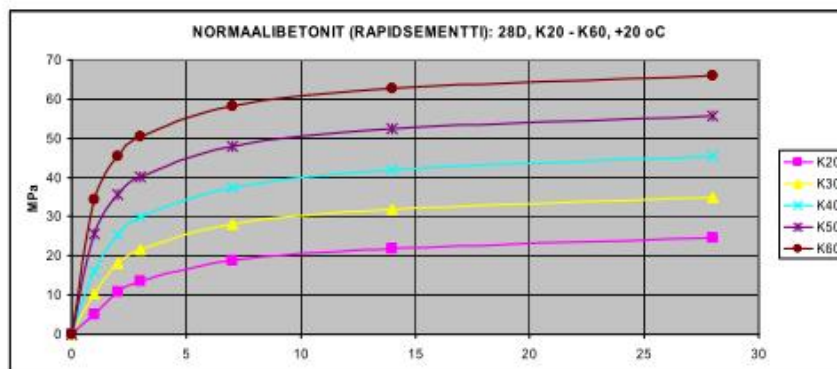
Saatujen tulosten perusteella jäätymislujuus 5 MPa saavutetaan noin 1-4 vuorokauden aikana lämpötilan ollessa korkeampi kuin -5 °C, mutta lämpötilan ollessa -10 °C kestää jäätymislajuuden saavuttaminen noin 30 vuorokautta.

Kun tarkastellaan normaalin k-30 (C25/30) betonimassan lujuudenkehitystä +20 °C lämpötilassa, voidaan huomata että normaalimassan lujuus on 28 päivän iässä noin 45 MPa. Pakkasbetonimassan lujuus kehittyy suurin piirtein samaa tahtia, lämpötilan ollessa noin +5 °C, mutta lämpötilan ollessa noin 0 °C pakkasbetonilta kestää noin 40-45 päivää päästä samoihin lujuuslukemiin.

Kun pakkasbetonimassan lämpötila jää alle 0 °C, ei lujuutta 45 MPa saavuteta vielä 56 päivässäkään.

NORMAALI BETONILAATU (28d): RAPIDSEMENTTI
CEM II 42,5 R (FINNSEMENTTI)

Aika	0	1	2	3	7	14	28
K20	0	4,9	10,7	13,6	18,7	21,9	24,5
K30	0	10,3	18	21,7	28	31,9	34,9
K40	0	16,1	25,4	29,9	37,4	42	45,4
K50	0	25,6	35,6	40,2	47,8	52,4	55,8
K60	0	34,4	45,5	50,4	58,1	62,6	65,9

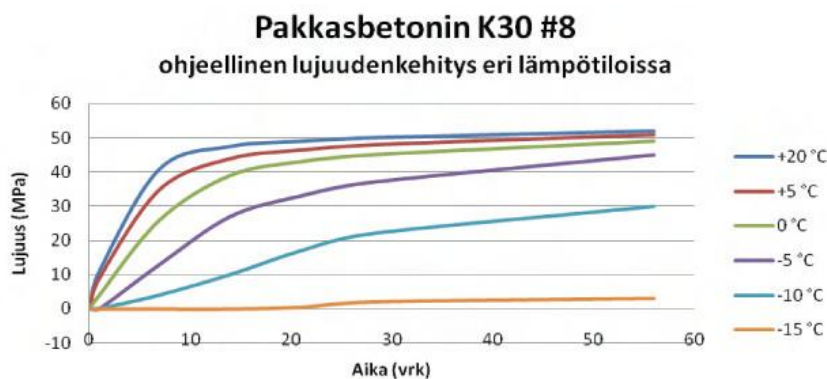


KUVIO 18. Normaali betonin lujuudenkehitys (By60 suunnitteluohje. 20)

11. YHTEENVETO

Saadut tutkimustulokset ovat melko lailla odotetun kaltaisia ja vaikuttavat olevan linjassa muiden pakkasbetonin valmistajien saamien tulosten kanssa.

Tästä voidaan päätellä, että tutkimus on kaikista vaikeuksista huolimatta lopulta varsin onnistunut ja kuvaa hyvin Lujabetonin pakkasbetonin lujuudenkehitystä eri lämpötiloissa.



KUVIO 19. Pakkasbetonin ohjeellinen lujuudenkehitys (Betonielementtien talvisumaushje 2011. 4)

Jos haluttaisiin saada täysin täsmällistä tietoa Pakkasbetonin lujuudenkehityksestä tietyssä lämpötilassa, olisi ainoa mahdollisuus tehdä kokeet ”laboratorioolosuhteissa”, jossa kunkin koekappaleen lämpötila pysyisi täysin muuttumattomana, riippumatta esimerkiksi sen sijainnista kylmiössä.

En kuitenkaan usko, että tämänkaltaisilla tuloksilla olisi sen enempää käyttöarvoa, kuin tässä tutkimuksessa saaduilla, koska valun lämpötila ei missään olosuhteissa tule pysymään aivan täysin vakiona, eivätkä eri aikaan tehdyt betonimassat ole ikinä täysin identtisiä keskenään.

Tutkimuksessa saadut tulokset, pienine virhemarginaaleineen antavat mielestäni hyvän pohjan työmaalla valetun pakkasbetonin lujuuden arvioimiseen lämpötiloja seuraamalla, ilman koekappaleiden poraamista.

Opinnäytetyön teoriaosan tekeminen oli haastavaa, sillä pakkasbetonista on saatavana erittäin vähän kirjallista tietoa. Tästä syystä tiedot pakkasbetonista on jouduttu keräämään kokoon useista eri lähteistä.

LÄHTEET

- 1963 sortui kerrostalo. 2012. Lahdessa sivusto. Viitattu 13.10.2012. www.lahdessa.info » Uutiset » Arkisto » 1963 sortui kerrostalo
- Antifrost 45 esite (Puola). n.d. Ha-Be GmbH. Viitattu 29.10.2012. <http://www.ha-be.pl/mediafiles/1785.pdf>
- Antifrost 45 esite. n.d. Ha-Be GmbH. Viitattu 28.10.2012. http://www.ha-be.com/_mediafiles/1750-tm-antifrost-45.pdf
- Betonielementtien talvisaumausohje 2011. Betoniteollisuus Ry. Viitattu 15.10.2012. <http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23673/Betonielementtien%20talvisaumausohje%202011.pdf>
- Betonin kuljetus ja siirto. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 10.10.2012. <http://www.betoni.com/paikallavalurakentaminen/betonin-kuljetus-ja-siirto>
- Betonin käyttöikä. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 7.9.2012. <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-kestava-kehitys/betonin-kayttoika>
- Betonin lujuus. n.d. Finnsementti Oy. Viitattu 1.9.2012. <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus>
- Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta. n.d. Finnsementti Oy. Viitattu 1.9.2012. <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus-riippuu-vesi-sementtisuhteesta>
- Betonin notkeus. n.d. Finnsementti Oy. Viitattu 22.11.2012. <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-notkeus>
- Betonin ominaisuudet ja käyttö. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 9.9.2012. <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto>
- Betonin rasitusluokat lyhyesti. n.d. Finnsementti Oy. Viitattu 18.9.2012. <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-rasitusluokat-lyhyesti>
- Betoninormit BY 50. 2004. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Betonitekniikan oppikirja BY 201. 2004. Suomen Betoniyhdistys ry. Lahti: ESA Print Oy.

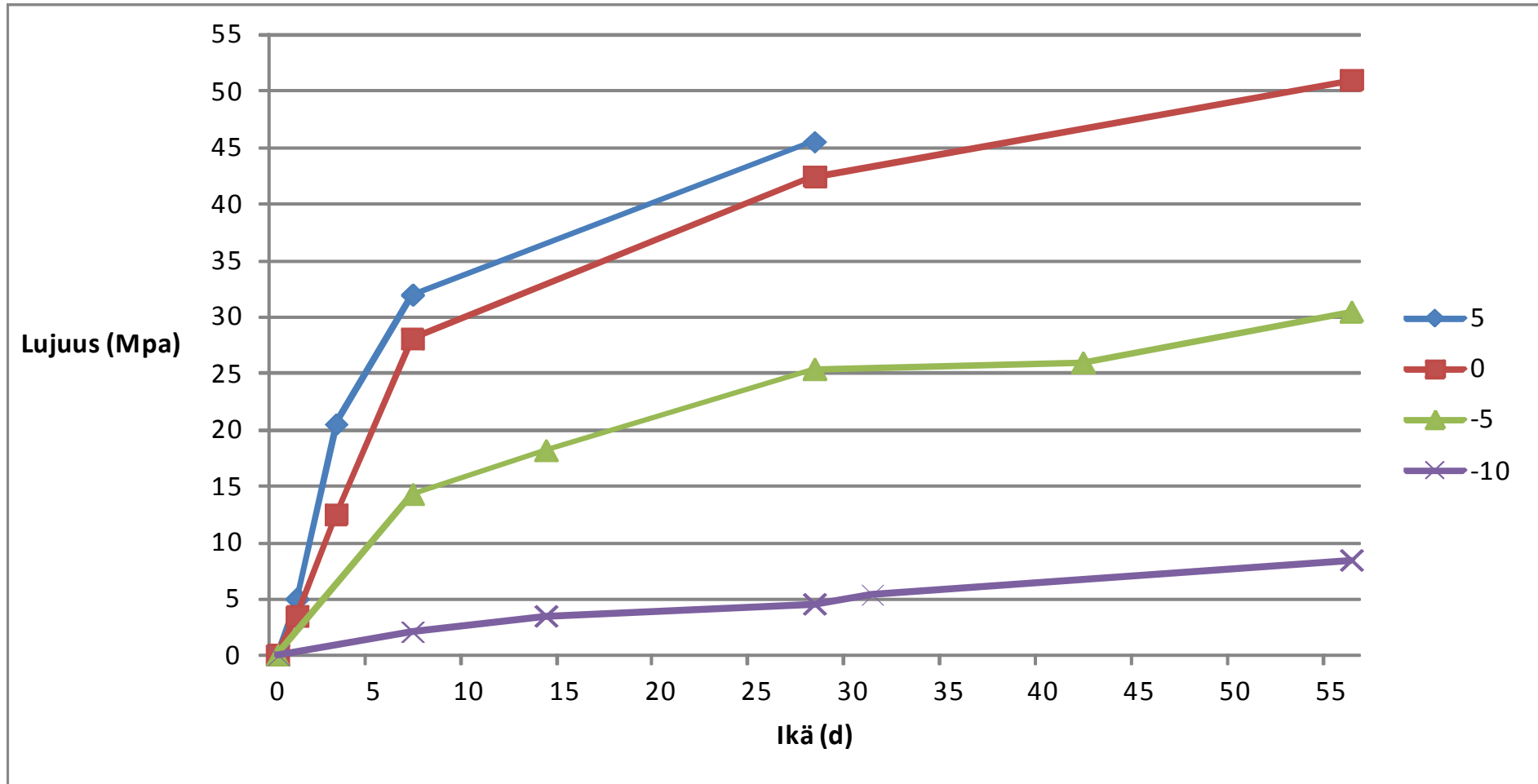
- Jälkihoito. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 11.10.2012.
<http://www.betoni.com/paikallavalurakentaminen/betonityot/jalkihoito>
- Jääbeto esite. 2011. Semtu Oy. Viitattu 10.10.2012.
http://www.semtu.fi/index.php/download_file/view/289/126/
- Kovanen T. 2012. Kehityspäällikkö, Lujabetoni Oy. Sähköpostiviestit 15.5.2012-25.10.2012. Vastaanottaja T. Lahtinen.
- Käyttökäymätoituksen menetelmät. n.d. Finnsementti Oy. Viitattu 18.10.2012. <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/kayttoikamitoituksen-menetelmat>
- Lujabetoni yrityksenä. n.d. Lujabetoni Oy. Viitattu 22.11.2012.
http://www.lujabetoni.fi/lujabetoni_yrityksena
- Lähes 60 vuotta Lujaa yrittäjähänkeä. n.d. Luja Oy. Viitattu 22.11.2012.
<http://www.luja.fi/yhtiomme>
- Mitä betonin valmistuksessa tehdään. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 10.9.2012. <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/mita-betonin-valmistuksessa-tehdaan>
- Seosaineiden käyttö. n.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 1.10.2012.
<http://www.betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-kestava-kehitys/seosaineiden-kaytto>
- SFS 12350-1. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 1: Näytteenotto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 4.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12350-2. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 2: Painuma. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 2.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12350-3. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 3: Vebe. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 1.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12350-4. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 4: Tiivistymisaste. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 4.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12350-5. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 5: Leviämä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 3.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12350-6. 2009. Tuoreen betonin testaus, Osa 6: Tiheys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 2.11.2012.
<http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12390-1. 2004. Kovettuneen betonin testaus, osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. Helsinki: Suomen

Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 29.10.2012.
[Http://www.jamk.fi/kirjasto](http://www.jamk.fi/kirjasto), Nelli-portaali, SFS Online.

- SFS 12390-2. 2009. Kovettuneen betonin testaus, osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 2.11.2012. [Http://www.jamk.fi/kirjasto](http://www.jamk.fi/kirjasto), Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 12390-3. 2009. Kovettuneen betonin testaus, osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 2.11.2012. [Http://www.jamk.fi/kirjasto](http://www.jamk.fi/kirjasto), Nelli-portaali, SFS Online.
- SFS 7022. 2010. Betoni: Standardin SFS-EN 206-1 käyttö Suomessa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 5.11.2012. [Http://www.jamk.fi/kirjasto](http://www.jamk.fi/kirjasto), Nelli-portaali, SFS Online.
- Termiset vuodenajat. 2010. Ilmatieteenlaitos. Viitattu 17.10.2012. <http://ilmatieteenlaitos.fi/termiset-vuodenajat>
- Valmisbetonihinnasto Jyväskylä. 2012. Lujabetoni Oy. Viitattu 29.10.2012.
[http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoniwwwstructure/19689 Hinnasto JKL NETTI 01.02.2012.pdf](http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoniwwwstructure/19689%20Hinnasto%20JKL%20NETTI%2001.02.2012.pdf)

LIITTEET

Liite 1: Lujuuskäyrät tutkimustuloksista



Liite 2: Testaustulokset Jyväskylä

Pakkasbetonin testaukset		15.touko						
		16.5.	18.5.	22.5.	29.5.	12.6.	26.6.	10.7.
	Testausikä	1	3	7	14	28	42	56
Rapidsementti	+5	2280g/50KN	2265g/210KN 2265g/215KN	2260g/325KN 2260g/330KN		2260g/470KN 2260g/465KN		
	0	2250g/35KN	2270g/140KN 2260g/120KN	2230g/290KN 2260g/290KN		2250g/445KN 2220g/430KN		2300g/535KN 2280g/520KN
	-5		2300g/75KN	2280g/240KN 2300g/230KN	2245g/210KN 2235g/225KN	2260g/275KN 2270g/265KN	2260g/170KN	2220g/435KN 2230g/445KN
	-10			2250g/95KN	2300g/35KN 2235g/35KN	Pakastin sulanut	Pakastin sulanut	Pakastin sulanut
	-15	Tätä ei testata!!						
Rautamuotit 12								
Muovimuotit 11								
Ei testata								

22.5.2012 testatut, lämpötiloissa -5 °C ja -10 °C olleet koekappaleet otettiin sulamaan sisätiloihin edellisenä iltapäivänä. Kyseiset koekappaleet olivat sulaneet ja oletettavasti keränneet myös lujuutta sulatuksen aikana.

29.5.2012 testatut, lämpötiloissa -5 °C ja -10 °C olleet koekappaleet nostettiin sulamaan ulos edellisenä iltapäivänä ja testattiin seuraavana aamuna. Lämpötilassa -5 °C olleiden kappaleiden lämpötila oli testattaessa 10 °C ja lämpötilassa -10 °C olleiden kappaleiden lämpötila 12 °C. Pakkaslämpötiloissa olleet koekappaleet kerkesivät oletettavasti keräämään myös lujuutta sulamisen aikana.

12.6.2012 testatut, -10 °C lämpötilassa olleet kappaleet pääsivät sulamaan omia aikojaan pakastimen lopetettua toimintansa. -5 °C olleet kappaleet nostettu sulamaan noin 2 tuntia ennen testaamista ja niiden sisälämpötila oli puristettaessa 6,9 °C.

Liite 3: Testaustulokset Siilinjärvi

Pakkasbetonin testaukset		13.elo											
	pvm	7.1.		14.1.		28.1.		13.9.		11.2.		25.2.	
	Testausikä	7		14		28		31		42		56	
-5	paino (kg)	2,34	2,34	2,33	2,33	2,32	2,32			2,33	2,33	2,33	2,34
	tiheys (kg/m³)	2340	2340	2330	2330	2320	2320			2330	2330	2330	2340
	KA tiheys	2340,0		2330,0		2320,0				2330,0		2335,0	
	voima (kN)	144	150	183	192	263	260			257	280	308	320
	puristuslujuus	14,0	14,6	17,8	18,6	25,5	25,2			24,9	27,2	29,9	31,0
	KA puristus	14,3		18,2		25,4				26,0		30,5	
-10	paino (kg)	2,34	2,33	2,32	2,32	2,31	2,31	2,36	2,33			2,32	2,32
	tiheys (kg/m³)	2340	2330	2320	2320	2310	2310	2360	2330			2320	2320
	KA tiheys	2335,0		2320,0		2310,0		2345,0				2320,0	
	voima (kN)	21	22	34	38	46	48	65	47			100	75
	puristuslujuus	2,0	2,1	3,3	3,7	4,5	4,7	6,3	4,6			9,7	7,3
	KA puristus	2,1		3,5		4,6		5,4				8,5	
								Pakastin hajonnut -> loput 2kpl siirretty -5 asteeseen päiväksi -> pakasti korjattu loppu säilytys -10 asteessa -					

Liite 4: Näytteenottopäiväkirja pakkasbetonista (Lujabetoni, 2012)



Näytteenottopöytäkirja

24.09.2012 9:45

Näytteen perustiedot			
Näytteenottopäivä :	13.08.2012	Näytteenottoaikka :	Sulinjärvi - ulosmyynti
Näytetunnus :	PB-KOE	Näytteenottaja :	Korhonen, Eero
Betoniperhe :	Pakkasbetonit (PB)		
Huomioita :			
7 vrk pakastimessa (-10), 28 vrk normisäilytys, testausikä 35 vrk			

Betonin koostumus (suhteitus)			
Reseptin nimi :	Pakkasbetoni (PB) / C25/30 / S3 / 6	Tuotekoodi :	77690
Lujuusluokka :	K30	Lujuusluokka (CEN) :	C25/30
Notkeusluokka :	S3	V/S-suhde (maksimi) :	0,00
Nimellislujuus :	30,00 MPa	Tavoitelujuus :	34,00 MPa
D _{MAX} :	6	Sementin määrä (minimi) :	0,00 kg/m ³
P-luku :	0	Ilmamäärä (minimi/maksimi) :	2,00 % / 0,00 %
Kloridipitoisuus :	0,00	Lämpötila (minimi/maksimi) :	0 °C / 0 °C
Tiheys :	0,00 kg/m ³		
Suhteitusryhmä :	Pakkasbetoni (PB)		
Rasitusluokat :			

Tuoreen betonin testaus			
Kloridipitoisuus :		Kokonaisvesi (tehdollinen) :	122,10
Tiheys :	0,00 kg/m ³	Sementin määrä :	395,90 kg/m ³
Lämpötila :	22,00 °C	Ilmamäärä :	2,00 %
Ulkolämpötila :	0,00 °C	P-luku :	0,00
Vebe :	0 s	F-luku :	0,00
Painauma :	240 mm	Leviämä :	0 mm
Tiivistymisaste :	0,00	V/S-suhde :	0,52
Jälkihoidaika :	7 d		

Annoksen/kuorman tiedot (toteutuneet)			
Kuormakirjanumero :	E87068	Annosnumero :	1
Asiakkaan viite :	1	Kuormakoko :	1,00 m ³
Toimitustapa :		Annoskoko :	1,00 m ³
Asiakas :	Yläasema 301		
Työkohde/elementti :			

Annostelutiedot

Kivinaaineet	Kosteus [%]	Tav [kg]	Tot [kg]	Ero	Lisäaineet	Tav [kg]	Tot [kg]	Ero
0-6/2	4,80	1405,00	1422,00	1,2 %	SKY-600	3,60	3,61	0,3 %
6-12/3	1,20	172,00	195,00	13,4 %				
Filleri/5	9,00	180,00	177,00	-1,7 %				
Sementit	Tav [kg]	Tot [kg]	Ero	Vedet	Tav [kg]	Tot [kg]	Ero	
CEM II/A-LL 42,5 R	400,00	395,90	-1,0 %	Lisavesi l	0	23,30	0,0 %	
				Vesi	98,70	98,80	0,1 %	
Seosaineet	Tav [kg]	Tot [kg]	Ero					

Kovettuneen massan testaus (näytekappaleet) :

Testauspäivä	Tunnus	d	m[g]	Ac[cm²]	F[kN]	F _{ak,150} [MPa]	F _d [MPa]	F _{u,150} [MPa]
17.09.2012	PB-KOE/1	35	7 980,00	225,00	1 064,0	34,0	47,5	47,5
Muotin tunnus	Muoto	h[mm]	w[mm]	d[mm]	V[cm³]	Tiheys[kg/m³]		
kuntio 150	Kuntio	150,00	150,00	150,00	3 375,00	2 364,00		

Testauspäivä	Tunnus	d	m[g]	Ac[cm²]	F[kN]	F _{ak,150} [MPa]	F _d [MPa]	F _{u,150} [MPa]
17.09.2012	PB-KOE/2	35	8 000,00	225,00	1 016,0	34,0	45,0	45,0
Muotin tunnus	Muoto	h[mm]	w[mm]	d[mm]	V[cm³]	Tiheys[kg/m³]		
kuntio 150	Kuntio	150,00	150,00	150,00	3 375,00	2 370,00		

Testauspäivä	Tunnus	d	m[g]	Ac[cm²]	F[kN]	F _{ak,150} [MPa]	F _d [MPa]	F _{u,150} [MPa]
17.09.2012	PB-KOE/3	35	8 020,00	225,00	1 046,0	34,0	46,5	46,5
Muotin tunnus	Muoto	h[mm]	w[mm]	d[mm]	V[cm³]	Tiheys[kg/m³]		
kuntio 150	Kuntio	150,00	150,00	150,00	3 375,00	2 376,00		

d = Ikä	m[g] = Massa	Ac[cm²] = Pään pinta-ala	F[kN] = Murtolujuus
F _{ak,150} [MPa] = Tavoitelujuus	F _d [MPa] = Mittattu lujuus	F _{u,150} [MPa] = Kuntiolujuus	V[cm³] = Tilavuus
h[mm] = Korkeus	w[mm] = Leveys	a[mm] = Halkaisija	d[mm] = Syvyys

Aika ja paikka :

Allekirjoitus

Nimen selvennys :

Liite 5: Tuotelehti Antifrost 45 (HaBe, 2012)



ANTIFROST 45

Item No. 0560

Non-chloride accelerating and anti-freeze admixture for reinforced concrete

Fields of Application

ANTIFROST 45 accelerates the initial and final setting of concrete, mortar and screed. By using ANTIFROST 45 high early strengths can be achieved, which allow an early stripping of form work. Simultaneously the concrete ought to have the necessary strength to withstand freezing during the early stages.

ANTIFROST 45 is particularly suited for pouring and processing concrete under frosty weather conditions.

ANTIFROST 45 protects steel reinforced concrete including precast and prestressed concrete against chloride induced corrosion.

Dosage

Recommended dosage range 0.5 – 2.0 mass-%; equals 3.5 – 14 ml per kg cement.

Working Principle

ANTIFROST 45 accelerates the cement hydration and optimises its heat development. During its initial setting time ANTIFROST 45 minimises the occurrence of shrinking cracks.

Technical Data

Steadiness	homogenous
Colour	transparent
Active substances	calciumnitrate
State	liquid
Density	$1.43 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$
pH-value	5.5 ± 1
Chloride content	< 0.10 mass-%
Alkali content as Na_2O - equivalent	< 1.0 mass-%
Workability	below -1°C
Durability	approx. 1 year
Storage	In closed containers cool but frost-free. Protect from intense solar radiation!